



РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ
КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ



САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА

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

Самара
6 – 8 сентября 2011 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

*Конференция проводится при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ)*



Москва, 2011

УДК [681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

Д25

Д25 XIX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов. Самара, 6 – 8 сентября 2011 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 496 с.: ил.

ISBN 978-5-904270-80-3

Сборник содержит тезисы научных докладов, представленных на XIX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Изложены результаты работ более 150 российских и зарубежных фирм – мировых лидеров по производству средств неразрушающего контроля и технической диагностики. В состав сборника вошли работы в области техногенной диагностики, антитеррористической диагностики, экологической диагностики, технического регулирования и определения остаточного ресурса.

УДК[681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

XIX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Самара, 6 – 8 сентября 2011 г.

Редакционный совет: *Артемьев Б.В., Бобров В.Т., Елисеев Д.А., Клейзер П.Е.*

Инженер по компьютерному макетированию *Г.Ю. Корабельникова*

Художественное оформление *Н.В. Клейзер*

ISBN 978-5-904270-80-3



9 785904 270803

Сдано в набор 04.07.2011 г. Подписано в печать 16.08.2011 г.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 29,5. Тираж 250 экз. Заказ

ООО «Издательский дом «СПЕКТР»,
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1. Тел.: (495) 514 7650.
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: info@idspektr.ru

Отпечатано в ОАО «Подольская фабрика офсетной печати».
142100, Московская область, г. Подольск, Революционный
проспект, д. 80/42. [Http://www.ofsetpodolsk.ru](http://www.ofsetpodolsk.ru)

ISBN 978-5-904270-80-3

© РОНКТД, 2011

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

1. ИННОВАЦИОННАЯ СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НК и ТД <i>Клюев В.В., Бобров В.Т.</i>	24
2. РАБОТЫ СГАУ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ <i>Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В.</i>	25
3. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СТРУКТУРНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЙ <i>Горкунов Э.С.</i>	28
4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ <i>Стеблев Ю.И., Бьков Д.Е., Сусарев С.В., Михайлов В.Ф.</i>	28
5. КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОПАРАМЕТРОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СПЛОШНОСТИ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Будадин О.Н., Кутюрин Ю.Г., Филиппенко А.А.</i>	31
6. ВЫСТУПЛЕНИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ЗАРУБЕЖНЫХ ОБЩЕСТВ ПО НК <i>Лухвич А., Казакевич М.Л., Таджиев А., Ермаков Е., Бобренко В.Н., Рагульскис К.Н., Кожаринов В.В. и др.</i>	

ТЕХНОГЕННАЯ ДИАГНОСТИКА

Секция № 1

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

<i>Руководители секции: Горкунов Э.С., Шелихов Г.С.</i>	36
1. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПАРА- И ДИАМАГНИТНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ <i>Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Кузеванов В.Ф.</i>	36
2. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ЗОНЕ КОНТРОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ П-ОБРАЗНЫХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ <i>Василенко О.Н., Костин В.Н., Бида Г.В.</i>	37

3. К МАГНИТНОМУ КОНТРОЛЮ УРОВНЯ ЗАТЯЖКИ СТАЛЬНЫХ ШПИЛЕК И БОЛТОВ КОРПУСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ <i>Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р.</i>	40
4. К ВОПРОСУ О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ДИАГНОСТИКЕ СТЕПЕНИ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ СТАЛЕЙ <i>Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Макаров А.В., Саврай Р.А.</i>	43
5. СКАНИРУЮЩИЙ КОЭРЦИТИМЕТР <i>Захаров В.А., Молин С.М., Зотов А.А., Ленков С.В.</i>	45
6. О ФОРМИРОВАНИИ МАГНИТНЫХ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ <i>Ульянов А.И., Чулкина А.А., Зыкина И.А., Волков В.А., Загайнов А.В.</i>	48
7. ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «СТАЛЬ 12Х18Н10Т – СТАЛЬ Ст3» И ЕГО КОМПОНЕНТ ПОСЛЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ <i>Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Туева Е.А., Горулева Л.С., Голубкова И.А., Каманцев И.С.</i>	50
8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ <i>Субачев Ю.В., Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Ульянов А.И.</i>	53
9. ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА В МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИХ СТАЛЯХ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ <i>Сташков А.Н., Сомова В.М., Сажина Е.Ю., Сташкова Л.А., Ничипурук А.П.</i>	56
10. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЕЙ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И ОЦЕНКА ЕЕ ВЕЛИЧИНЫ ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ <i>Сандомирский С.Г.</i>	59
11. РАСЧЕТ РЕЛАКСАЦИОННОЙ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА И ТЕЛА <i>Сандомирский С.Г.</i>	63

12. ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЕЙ ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ, ИЗМЕРЕННЫМ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ	
<i>Сандомирский С.Г.</i>	66
13. МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ АУСТЕНИТНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ	
<i>Ригмант М.Б., Ничипурук А.П., Корх М.К., Огнева М.С., Степанова Н.Н., Казанцева Н.В., Давыдов Д.И.</i>	69
14. ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ И ГЕОМЕТРИИ СВАРНОГО ШВА ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ	
<i>Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Туева Е.А., Горулева Л.С., Задворкин С.М.</i>	70
15. КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ	
<i>Лухвич А.А., Шукевич А.К., Лукьянов А.Л., Полоневич А.А., Калошин В.А.</i>	71
16. ВЫБОР МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ	
<i>Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л., Полоневич А.А.</i>	75
17. КОНТРОЛЬ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ КАМЕР СГОРАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	
<i>Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л., Полоневич А.А.</i>	79
18. ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОПОРОШКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ	
<i>Бакунов А.С., Кудрявцев Д.А., Ефимов А.Г., Онегин М.А.</i>	82
19. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ РАСТЯГИВАЮЩИХ УПРУГИХ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ	
<i>Костин К.В., Царькова Т.П., Смородинский Я.Г.</i>	84
20. ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ НОВЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ (Fe-Cr-Ni-Co-Mo-Al) СТАЛЕЙ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО ИХ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ	
<i>Горулева Л.С., Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Мальцева Л.А., Мальцева Т.В., Левина А.В.</i>	87

21. ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 09Г2С, УПРочЕННОЙ РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ, ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ <i>Горулева Л.С., Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Туева Е.А., Веселов И.Н., Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г.</i>	90
22. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА В СРАВНЕНИИ С ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ НК И СРЕДСТВАМИ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ <i>Дубов А.А., Колокольников С.М.</i>	93
23. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО ПАРАМЕТРАМ ТВЕРДОСТИ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЯВЛЕННЫХ В ИЗДЕЛИЯХ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА <i>Матюнин В.М., Дубов А.А.</i>	94
24. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ БЕЗ СНЯТИЯ ИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ И МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА <i>Дубов А.А.</i>	95
25. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ПОД СТЕНКОЙ ТРУБОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО КОНТРОЛЯ <i>Мишин А.Р.</i>	97
26. ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОПЕРЕЧНЫХ СВАРНЫХ ШВАХ ПРИ ВНУТРИТРУБНОМ МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ ТРУБОПРОВОДОВ <i>Гамза Д.В.</i>	97
27. SEEN INVISIBLE, FURTHER DEVELOPMENT FOR OPERATIONAL SAFETY <i>Isaac Einav, Richmond Hill</i>	98
28. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИНДИКАТОРНЫХ РИСУНКОВ ДЕФЕКТОВ НА ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКЕ <i>Новиков Вл.А., Скрябина Г.И., Шилов А.Вл., Кушнер А.В.</i>	100
29. КАК ОТЛИЧИТЬ ТРЕЩИНУ ОТ РИСКА ПО ВИДУ СИГНАЛА <i>Новиков Вл.А., Скрябина Г.И., Кушнер А.В., Шилов А.Вл.</i>	103
30. ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИСТАВНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕМ <i>Сташков А.Н., Ничипурук А.П., Огнева М.С.</i>	108

Секция № 2

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции:

Будадин О.Н., Абрамова Е.В. 109

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОПТО-ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ухаров А.С., Будадин О.Н., Гринштейн М.Л. 109

2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Пудовкина Е.В., Антонов А.О., Майникова Н.Ф., Рогов И.В. 113

3. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ЭНЕРГОАУДИТЕ

Абрамова Е.В., Будадин О.Н., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. 116

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Попов О.Н., Бардадымова О.Н., Жуков Н.П., Майникова Н.Ф. 118

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ МИКРОМЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р. 121

6. РАЗВИТИЕ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО МЕТОДА НК

Ковалёв А.В., Матвеев В.И. 123

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО АНАЛИЗУ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Будадин О.Н., Хузин Р.К. 124

8. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

Евсеев Л.Д., Троицкий-Марков Т.Е. 129

9. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Онопко Н.В., Чумаков А.Г. 131

10. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

Абрамов А.С., Шатерников С.В. 135

11. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ БРОНЕВЫХ ПРЕГРАД НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ КОНТРОЛЯ <i>Ермоленко А.Ф., Будадин О.Н., Харченко Е.Ф.</i>	136
12. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ РАССЛОЕНИЙ В СЕТЧАТЫХ СТРУКТУРАХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ КОНТРОЛЯ <i>Филиппенко А.А., Слитков М.Н., Муханов Е.Е.</i>	144
13. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ <i>Абрамова Е.В.</i>	147

Секция № 3

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции:

Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Шатерников В.Е.

1. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВИХРЕТОКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА ВД-90НП ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ВО ВРЕМЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ	152
--	-----

Шубочкин А.Е., Ефимов А.Г.

2. РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВЫХ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ	152
--	-----

Сясько В.А., Ивкин А.Е.

3. ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ С ИЗМЕРЕНИЕМ СИЛЫ ЛОРЕНЦА	153
---	-----

Пахомов Д.Н., Брауер Х., Лунин В.П.

4. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ	154
---	-----

Крюков А.С., Лунин В.П., Жданов А.Г.

5. ВИХРЕТОКОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД	157
--	-----

Гудков С.А., Кудрявцев И.А.

6. ПРИМЕНЕНИЕ ВТ МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ	160
---	-----

Гребеньков П.М., Яцков М.В., Чегодаев В.В.

	162
--	-----

7. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ <i>Федосенко Ю.К.</i>	163
8. ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ТРЕЩИН В СТЕНКАХ ОТВЕРСТИЙ <i>Дидин Г.А., Шкатов П.Н., Ездаков В.А.</i>	164
9. ИДЕНТИФИКАЦИЯ КЛАСТЕРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН <i>Меркулов А.И., Валулина И.Р., Лавров А.Ю.</i>	165
10. УНИВЕРСАЛЬНОЕ ВИХРЕТОКОВОЕ УСТРОЙСТВО С ИНТЕРФЕЙСОМ USB <i>Покровский А.Д., Хвостов А.А.</i>	167
11. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ КОНТРОЛИРУЕМОГО УЧАСТКА НА РЕГИСТРИРУЕМЫЕ СИГНАЛЫ ПРИ ВИХРЕТОКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ <i>Шкатов П.Н., Колосков Д.В.</i>	170
12. ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ <i>Шкатов П.Н., Куценко Д.О.</i>	171
13. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ Nb ₃ Sn ДЛЯ ИТЭР ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ <i>Шкатов П.Н., Фигуровский Д.К., Петелин А., Тронза В.И.</i>	173
14. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ РЕЗИНОПОДОБНОГО ПОКРЫТИЯ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ <i>Фоменко А.И., Юхацкова О.В., Муханов Е.Е., Гульбис М.А.</i>	174
15. АНАЛИЗ ПРИЗНАКОВ ВИХРЕТОКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРА <i>Барabanов П.А., Лунин В.П.</i>	179
16. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ СКАНЕР-ДЕФЕКТОСКОП «ВИХРЬ» ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ <i>Коннов В.В., Кузнецов А.М., Коннов Вл.Вл., Коннов А.В.</i>	180

Секция № 4

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции:

<i>Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г.</i>	181
---	-----

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКОЙ <i>Воронков И.В.</i>	181
2. ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ МАЛОАПЕРТУРНЫХ ЭМАП <i>Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Бобров С.В.</i>	182
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕРМОГРАФИИ <i>Будадин О.Н., Кутюрин В.Ю., Кутюрин Ю.Г., Юхацкова О.В.</i>	184
4. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗОН СВАРНЫХ ТРУБ <i>Ткаченко А.А., Исаенко Ф.И., Кирияков В.Ф., Сирый В.Д., Захаров А.Ф.</i>	189
5. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ОТЛИВОК – НОВЫЙ ОБЪЕКТ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ <i>Воронкова Л.В., Носов В.А.</i>	191
6. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ДЕФЕКТОСКОПА ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ КОНТРОЛЕ КРАЕВЫХ ПОЛОС КОНЦОВ СВАРНЫХ ТРУБ <i>Ткаченко А.А.</i>	192
7. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ <i>Тимохин А.В., Модин А.Ю., Стеблев Ю.И., Пилуй В.А.</i>	195
8. О ПРИМЕНЕНИИ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННОГО ПЭП В РЕЖИМЕ ПРИЕМА ЭХОСИГНАЛОВ <i>Ткаченко А.А.</i>	197
9. К ВОПРОСУ ОБ ЭТАЛОНИРОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА <i>Пилуй В.А.</i>	199
10. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ВАЛОВ ТУРБИН И ГЕНЕРАТОРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ <i>Сидоренко И.Г.</i>	201
11. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ С ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКОЙ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ <i>Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.</i>	202
12. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОПОДУКЦИИ В ОАО «ЧМК» <i>Молоканов С.Я.</i>	203

13. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ (СОД-1) УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ <i>Кутюрин Ю.Г., Борисенко В.В., Юхацкова О.В.</i>	205
14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕЛЬНОКАТАННЫХ КОЛЕСАХ, БАНДАЖАХ И РЕЛЬСАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ <i>Муравьев В.В., Муравьева О.В., Балобанов Е.Н., Волкова Л.В.</i>	209
15. ВОЗМОЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОСЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ <i>Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Мирошников В.В., Хащина С.В., Маслова М.С.</i>	212
16. ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ УЗП ПРИ КОНТРОЛЕ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА <i>Модин А.Ю.</i>	215
17. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ФАЗИРОВАННЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ <i>Коновалов Н.Н., Мелешко Н.В.</i>	217
18. СПОСОБ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ <i>Курашкин К.В., Мишакин В.В.</i>	218
19. ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ И НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ <i>Чуприн В.А.</i>	220
20. СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА <i>Тарабрин В.Ф., Одынец С.А., Бугаенко В.М., Кононов Д.А., Чистякова О.Е., Главатский Д.А.</i>	223
21. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК <i>Бойчук А.С.</i>	224
22. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ ПО ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА <i>Юхацкова О.В., Муханов Е.Е.</i>	226
23. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ПЕРЬЕВ ПОДОШВЫ РЕЛЬСОВ <i>Чистякова О.Е.</i>	231

24. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ <i>Борминский С.А., Солнцева А.В.</i>	233
25. ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ РЕЛЬСОВ <i>Кононов Д.А.</i>	236
26. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК И С-SAFT ОБРАБОТКИ <i>Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С.</i>	237
27. ОПЫТ АУЗК АУСТЕНИТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Вопилкин А.Х., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С.</i>	237
28. УСЕЧЕННЫЙ ДЕЛЬТА-МЕТОД. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ <i>Гурвич А.К., Васильев В.А.</i>	240
29. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПРОЗВУЧИВАНИИ <i>Козлов В.Н.</i>	242

Секция № 5

РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции:

<i>Артемьев Б.В., Гориков В.А.</i>	244
1. АППАРАТУРНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ, ДЕЛЯЩИХСЯ И ОСОБО ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ <i>Гориков В.А., Иванов И.Н., Юмашев В.М.</i>	244
2. РЕНТГЕНОСКОПИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ. <i>Косарина Е.И., Степанов А.В., Усачев В.Е.</i>	245
3. ЭКСПРЕССНЫЙ КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ КУБИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ <i>Потрахов Н.Н., Осес Р.Х., Лифшиц В.А.</i>	247
4. ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ АРХИВИРОВАНИЯ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ СВАРНЫХ ШВОВ <i>Мартынов С.А., Самойлов Д.В.</i>	250
5. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СИГНАЛИЗАТОР ОПАСНОГО УРОВНЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СУР-02и <i>Мартынов С.А., Игнатов С.М.</i>	253

6. УЧАСТИЕ УЗБЕКИСТАНА В МЕЖДУНАРОДНОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ПРОЕКТЕ МАГАТЭ «ОПТИМИЗАЦИЯ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РАДИОГРАФИИ» <i>Азизова А.К.</i>	254
7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОЛЩИНОМЕРОВ <i>Артемьев Б.В., Созонтов А.Н.</i>	257
8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПБ 03-585 03 ПРИ РАДИОГРАФИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ <i>Гнедин М.М., Галкин Д.И.</i>	258

Секция № 6

ПОДГОТОВКА ПЕРСОНАЛА, МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Руководители секции:

<i>Барвинок В.А., Муравьев В.В., Муравская Н.П., Волкова Н.Н.</i> ..	259
1. СИСТЕМА ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ ПО ВИЗУАЛЬНОМУ И РАДИОГРАФИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ <i>Гнедин М.М., Галкин Д.И.</i>	259
2. КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ <i>Гуляева О.Г., Долгих А.В.</i>	260
3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ И АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ <i>Пилин Б.П., Ролдугина З.И.</i>	263
4. ПЕРЕХОД К ИЗМЕРЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЯХ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ <i>Венгринович В.Л., Цукерман В.Л., Дмитриевич Д.В., Остривной А.Ф., Иванов С.Ю., Лобашев А.А.</i>	264
5. КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОНСТРУКЦИЙ И ОБЪЕКТОВ <i>Крайний В.И., Троицкий-Марков Т.Е.</i>	265
6. СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КОНТАКТНОГО КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ <i>Кагиров А.Г.</i>	269
7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ (РВС) МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ <i>Дергачев А.Н.</i>	271

8. ПРЕЗЕНТАЦИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ»	
<i>Решетов А.А.</i>	273
9. К ВОПРОСУ О МЕТРОЛОГИИ СРЕДСТВ ТНК	
<i>Ковалев А.В., Матвеев В.И.</i>	276
10. О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ НДС	
<i>Дубов А.А., Коновалов Н.Н.</i>	278
11. ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ И СЕРТИФИКАЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ В ИЖЕВСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ	
<i>Муравьев В.В.</i>	279

Секция № 7

НК В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Руководители секции:

<i>Гречишников В.М., Кудрявцев И.А., Бобров В.Т.</i>	282
1. ДИАГНОСТИКА ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТИЦ ИЗНОСА	
<i>Кудрявцев И.А., Поминов Е.И., Корнилин Д.В.</i>	282
2. РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗУБЧАТОЙ ЛЕНТЫ ХВОСТОВОЙ БАЛКИ ВЕРТОЛЕТОВ МИ-2	
<i>Коротеев М.Ю., Соломенчук П.В.</i>	283
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ	
<i>Шкода А.С., Коптев А.Н.</i>	284
4. УСТРОЙСТВО КУЛОНОМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ЖИДКОСТЯХ	
<i>Потудинский А.А., Кудрявцев И.А.</i>	287
5. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПКМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕВЕРБЕРАЦИОННО-СКВОЗНОГО МЕТОДА	
<i>Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А.</i>	288
6. ДИАГНОСТИКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ДЕТАЛЯХ И КОНСТРУКЦИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ	
<i>Мурашов В.В., Мишууров К.С., Сорокин К.В.</i>	289

7. ИМИТАТОР ЛОПАТОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ПОВЕРКИ ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	
<i>Данилин А.И., Чернявский А.Ж., Теряева О.В.</i>	291
8. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ	
<i>Елин А.Ф.</i>	294
9. ВИХРЕТОКОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ.	
<i>Сясько В.А., Чертов Д.Н., Соломенчук П.В.</i>	294
10. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
<i>Кажис Р., Мажейка Л., Райшутис Р., Жукаускас Е., Шлитерис Р., Владишаускас А.</i>	295
11. ПРИЁМНИКИ ВОЗДУШНЫХ ДАВЛЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В СЛОЖНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ	
<i>Скворцов Б.В., Блинов Д.И., Конохов Г.А.</i>	296

Секция № 8

ВИЗУАЛЬНЫЙ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ И ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции:

<i>Матвеев В.И., Мишакин В.В., Данилин Н.С.</i>	299
1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ	
<i>Мишакин В.В., Гончар А.В., Гусев Ю.Б.</i>	299
2. КОНТРОЛЬ ВЛАГОПРОЧНОСТИ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТЕКЛЕ	
<i>Бородин Ю.В.</i>	301
3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ В РФ И СРЕДСТВ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ США	
<i>Сумкин П.С.</i>	304
4. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ	
<i>Теряева О.В., Данилин А.И., Чернявский А.Ж.</i>	306

Секция № 9

АВТОМАТИЗАЦИЯ НК

<i>Руководители секции: Матюнин С.А., Федосенко Ю.К.</i>	310
1. RESEARCH FOR DIGITAL AUTOMATIC TEST TECHNOLOGY OF HOLLOW AXLE IN MOTOR TRAIN UNIT <i>Wan Shengyun, Zhang Wenxian, Liu Shiyuan</i>	310
2. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОПОМПАЖНОЙ ЗАЩИТЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ <i>Решетов А.А., Пташков С.В.</i>	316
3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АКТИВНОМ ТЕПЛОМ КОНТРОЛЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Нестерук Д.А.</i>	319
4. МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ДОСТУПА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ <i>Никонов В.В., Севалкин А.А., Сумкин К.С., Абрамов А.А.</i>	321
5. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СИНТЕЗА СТИРОЛ-АКРИЛОВОЙ ДИСПЕРСИИ С ДИАГНОСТИКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ <i>Соболева Е.Г.</i>	324
6. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ: ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ <i>Слесарев Д.А.</i>	326
7. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РЕКТИФИКАЦИЕЙ ЭТАНОЛАМИНОВ С ДИАГНОСТИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА <i>Песков Н.П.</i>	328
8. ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВА PROAGENT ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА SIMATIC <i>Литин И.А.</i>	329
9. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИВИНИЛФОРМАЛЬЭТИЛАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА SIMATIC <i>Рябкова Т.А.</i>	331
10. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АСТРА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ <i>Тарабрин В.Ф., Зверев А.В.</i>	332

Секция № 10

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

<i>Руководители секции: Иванов В.И., Муравьева О.В., Кожаринов В.В.</i>	334
1. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	
<i>Овчарук В.Н.</i>	334
2. ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	
<i>Овчарук В.Н.</i>	337
3. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	
<i>Кондратенко Н.А., Барат В.А.</i>	340
4. К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ИНФОРМАТИВНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО И ЭЛЕКТРОРАЗЯДНО ЧАСТОТНОГО МЕТОДОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	
<i>Кожаринов Вал.В., Кожаринов Вл.В.</i>	341
5. АЭ ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА РИСКА АВАРИИ	
<i>Панчиков В.Н., Власов И.Э., Иванов В.И.</i>	342
6. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ БОКОВЫХ РАМ И НАДРЕССОРНЫХ БАЛОК ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ	
<i>Муравьев В.В., Муравьева О.В.</i>	344
7. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ, АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВЕРОЯТНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ	
<i>Комаров А.Г.</i>	346
8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЕ И АКУСТОУПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕРЖНЕВОЙ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОЛОКАХ	
<i>Муравьев В.В., Муравьева О.В., Платунов А.В.</i>	347

Секция № 11

НАНОДИАГНОСТИКА

<i>Руководители секции: Матвеев В.И., Демин А.В.</i>	349
1. НАНОСЕНСОРЫ В ПРИБОРАХ НК	
<i>Клюев В.В., Матвеев В.И.</i>	349

2. НОВЫЙ ПОДХОД К ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	
<i>Пушко С.В., Балиж К.С.</i>	350
3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕД И МЕТАМАТЕРИАЛОВ	
<i>Демин А.В., Золотаревский Ю.М., Иванов В.С., Левин Г.Г.</i>	352

Секция № 12

ТЕЧЕЙСКАНИЕ

<i>Руководители секции: Сажин С.Г., Тараненко Е.В.</i>	354
1. ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТРАСЛЕВЫХ МЕТОДИК КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С СОВРЕМЕННЫМИ ГЕЛИЕВЫМИ ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯМИ	
<i>Тараненко Е.В.</i>	354
2. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАТВОРОВ ШАРОВЫХ КРАНОВ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ	
<i>Степаненко О.А.</i>	355
3. КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТАХ	
<i>Мясников В.М., Сажин С.Г., Костиков Е.С.</i>	356
4. ОБРАБОТКА ДЕФЕКТΟΣКОПИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ УТЕЧКИ СПОСОБОМ ПАССИВНОГО СКАНИРОВАНИЯ	
<i>Мясников В.М., Сажин С.Г., Костиков Е.С.</i>	359

Секция № 13

КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ НК

<i>Руководители секции: Журавлев О.А., Иванов В.И.</i>	361
1. МНОГОПАРАМЕТРОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИЙ И ОБЪЕКТОВ	
<i>Крайний В.И., Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е.</i>	361
2. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	
<i>Тарабрин В.Ф.</i>	367
3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ	
<i>Горкунов Э.С., Владимиров А.П., Задворкин С.М.</i>	372

4. ПОИСК УТЕЧЕК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ПОДЗЕМНЫХ ТЕПЛОТРАССАХ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ	
<i>Коннов В.В., Чикалов С.Л., Коннов Вл.Вл., Безгоднов С.И., Коннов А.В.</i>	368
5. УЧЕТ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ (ЗТВ) СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАГНИТНО-ВИХРЕТОКОВОМУ КОНТРОЛЮ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	
<i>Шубочкин А.Е., Ефимов А.Г.</i>	373
6. ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА УПРУГИЕ МОДУЛИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ	
<i>Подымова Н.Б., Карабутов А.А., Кобелева Л.И., Чернышова Т.А.</i>	375
7. ДИАГНОСТИКА ТРЕЩИН В РОТОРНЫХ ДИСКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН МЕТОДАМИ ЦВЕТНОЙ, МАГНИТОПОРОШКОВОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ	
<i>Шмелев Н.Г., Крюков И.И.</i>	378
8. КОМПЛЕКСНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК СУДОВ НЕФТЕФЛОТА	
<i>Иванов А.Н., Стеблев Ю.И., Пантеровский С.В.</i>	380
9. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ СРЕД И ОБЪЕКТОВ	
<i>Скворцов Б.В., Голикова М.И., Шатерников С.В.</i>	383
10. НОРМАЛЬНЫЕ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ СМЕЩЕНИЯ УЗЛОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ	
<i>Ремезов В.Б.</i>	386
11. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОНТРОЛЯ РЕЛЬС, УЛОЖЕННЫХ В ПУТЬ, МАГНИТНЫМ, ВИХРЕТОКОВЫМ И КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДАМИ	
<i>Мякушев К.В.</i>	388
12. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО И АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ	
<i>Мишакин В.В., Данилова Н.В., Ключников В.А.</i>	390
13. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНАЦИИ МЕТОДОВ NDT	
<i>Makarov I.V., Skala I.J., Horak I.V.</i>	393
14. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА	
<i>Кудинова Е.В., Бакурова Ю.А.</i>	396

15. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ДВИГАТЕЛЯ <i>Сафин Ар.Ил., Иголкин А.А., Крючков А.Н., Макарьянц Г.М., Шахматов Е.В.</i>	400
16. ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С РАЗЛИЧНЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ <i>Панин С.В., Бурков М.В., Бяков А.В., Любутин П.С.</i>	403
17. НОВЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ НК «UNISCORE» <i>Елизаров С.В., Алякритский А.Л., Кольцов В.Г., Барат В.А., Ростовцев М.Ю.</i>	405
18. ПРИМЕНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРОМ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ КОНСТРУКЦИЙ <i>Прокофьев А.Б., Журавлев О.А., Миронова Т.Б., Жужукин А.И., Сергеев Р.Н.</i>	408

Секция № 14

ВИБРОДИАГНОСТИКА

Руководители секции:

<i>Решетов А.А., Егоров А.В.</i>	410
1. РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ <i>Симчук А.А.</i>	410
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Решетов А.А.</i>	412
3. ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ <i>Егоров А.В.</i>	415
4. ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ <i>Егоров А.В.</i>	418
5. ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМЕННЫХ И ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ <i>Егоров А.В.</i>	423
6. ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ <i>Егоров А.В., Зверев С.В.</i>	426

7. ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ <i>Белогусев В.Н., Егоров А.В.</i>	431
8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ <i>Белогусев В.Н., Егоров А.В.</i>	434

Секция № 15

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НК, ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС

<i>Руководители секции: Прокофьев А.Б., Кудрявцев И.А., Матвеев В.И., Данилин Н.С.</i>	438
1. ИНСПЕКЦИЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ РИСКА <i>Власов И.Э., Панчиков В.Н., Каковкин Д.А.</i>	438
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Юхацкова О.В., Муханов Е.Е., Сясько В.А., Чертов Д.Н.</i>	439
3. НА ПУТИ ОТ ДЕФЕКТОСКОПИИ К ДЕФЕКТОМЕТРИИ <i>Панчиков В.Н., Власов И.Э., Иванов В.И.</i>	444
4. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК РОТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ВНУТРЕННИМ И ПОВЕРХНОСНЫМ ДЕФЕКТАМ <i>Покасов Ю.И., Покасов И.М.</i>	446
5. ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ НАКЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ <i>Шкатов П.Н., Черненко П.И.</i>	447
6. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ОТБРАКОВКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ <i>Архипов А.И., Тюлевин С.В., Козлова И.Н., Костин А.В.</i>	448
7. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА МИКРОСХЕМ СЕРИИ 765 <i>Архипов А.В., Пиганов М.Н., Тюлевин С.В., Архипов А.И.</i>	450
8. МЕТОДИКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДИОДОВ <i>Хасиятуллов М.Г., Тюлевин С.В., Архипов А.И., Шотин Г.П.</i>	452
9. МЕТОДИКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ОТБРАКОВКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ <i>Козлова И.Н., Тюлевин С.В., Наседкин А.В.</i>	455
10. СКВОЗНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗИРУЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ФОТОДИОДОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ <i>Тюлевин С.В., Шумских И.Ю., Пиганов М.Н., Токарева А.В.</i>	458

11. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МИКРОСХЕМ СЕРИИ 286 <i>Гюлевин С.В., Архипов А.И., Арзамасцев И.И.</i>	460
12. МОДЕЛЬ АНАЛИЗА РИСКА ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ <i>Калакутский В.Л., Калакутский Л.И.</i>	461
13. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВА ННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ <i>Конов В.В., Пронин Н.С., Коннов Вл.Вл., Кузнецов А.М., Коннов А.В.</i>	463

Секция № 16

АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

<i>Руководители секции: Ковалев А.В., Усачев Е.Ю.</i>	464
1. ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ БЕТАТРОНОВ В АН ТИТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ <i>Волков В.Г., Зрелов Ю.Д., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Клименов В.А., Рычков М.М., Филимонов А.А., Штейн М.М.</i>	464
2. АППАРАТУРА ДЛЯ ДОСМОТРА ЛЕГКОВОГО И ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА <i>Щетинкин С.А., Аметов В.И., Чахлов С.В., Усачёв В.Е., Чумаков Д.М., Сысоев А.В., Дикаев Ю.М., Скачко А.В., Штейн М.М., Касьянов В.А.</i>	464
3. ДВУХЧАСТОТНОЕ АВТОГЕНЕРАТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ <i>Поляхов М.Ю., Хвостов А.И.</i>	465
4. ОБНАРУЖЕНИЕ ЕДИНИЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ «СОГЛАС НЫЙ-ГЛАСНЫЙ-СОГЛАСНЫЙ» И ПРИМЫКАЮЩИХ ЭКСПЛО ЗИВНЫХ СОБЫТИЙ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЧЕВОМ СИГНАЛЕ <i>Коршаков А.В.</i>	467
5. ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ПОДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОАМПЛИТУД НЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ В МНОГОКАНАЛЬНОМ МЭГ СИГНАЛЕ <i>Коршаков А.В.</i>	469
6. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДПОВЕРХНОСТНЫЙ РАДИОЛО КАТОР ДЛЯ НК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР <i>Ивашов С.И., Разевиг В.В., Васильев И.А., Журавлев А.В., Vechtel T., Carineri L.</i>	471
7. СИСТЕМА БЕСПИЛОТНОЙ МУЛЬТИРОТАЦИОННОЙ ЛЕ ТАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ <i>Насрулаев С.Ф.</i>	472

8. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ <i>Пугачев С.В.</i>	473
9. ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАБОТЫ СЕЛЕКТИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЯ <i>Пастухов Е.Г., Комаров Е.В., Поляхов М.Ю., Сидоров М.А.</i>	475

Секция № 17

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

<i>Руководители секции: Быков Д.Е., Кожаринов В.В.</i>	477
1. ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО ХРАНИЛИЩА ОБЪЕКТА «ЛИРА» <i>Ермаков Е.Л., Тиванова О.В., Акылбек Н.М.</i>	477
2. МОБИЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ <i>Порше А., Миронюк Д.Ю.</i>	478
3. О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СКВАЖИН <i>Рубцов М.Г.</i>	480
4. КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ <i>Чертес К.Л., Тупицына О.В.</i>	481
5. АППАРАТНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ <i>Рубцов М.Г., Купер В.Я., Тяп В.К.</i>	483
6. КОМПОЗИТНЫЙ ХИНГИДРОННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ pH ПРИРОДНЫХ ВОД <i>Романенко С.В., Раденков Т.А.</i>	486
7. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ БЛОК ПИТАНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ <i>Комаров Е.В., Малушин Д.С., Пастухов Е.Г., Поляхов М.Ю.</i>	488
Авторский указатель	491

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

ИННОВАЦИОННАЯ СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НК и ТД

Клюев В.В., Бобров В.Т., Артемьев Б.В.

ЗАО «НИИ ИН МНПО «СПЕКТР», Москва, Россия

Чрезвычайные ситуации (ЧС), все чаще возникающие при эксплуатации технологически сложных и опасных промышленных объектов (аварии на Чернобыльской АЭС, Саяно-Шушенской ГЭС, японской АЭС Фукусима, ставшие регулярными катастрофы космических кораблей, авиационные происшествия, аварии с человеческими жертвами), характерные для развитых стран мира, со второй половины XX века дополнились масштабными террористическими актами на транспорте. Безопасность населения и важных государственных, промышленных и транспортных объектов в России и в других странах находится под постоянной угрозой. Все еще слабо координируется деятельность научных организаций и производственных предприятий в области исследования методов, создания, производства и технологии применения систем и средств технической, экологической и анти-террористической диагностики. Недостаточное финансирование разработок, низкий уровень подготовки руководителей и персонала служб, отвечающих за безопасность, привели к моральному и физическому старению методов и средств неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) и к осознанию необходимости создания новых методов и средств на основе инновационной стратегии.

Основными направлениями стратегии, на наш взгляд, должны стать:

1. Использование для получения информации об объекте контроля:
 - новых для НК физических эффектов: квадрупольный ядерный резонанс, мультиэнергетическое сканирование, нейтронных генераторов, эффекта протонной проводимости и др.,
 - новых диапазонов электромагнитного излучения (терагерцовый и длинноволновая часть инфракрасного диапазона),
 - применение методов нанодиагностики.
2. Разработка новых принципов возбуждения и регистрации информативных сигналов: бесконтактные методы (электромагнитно-акустический – ЭМА, и лазерный способы, а также способы с сухим точечным контактом возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний (УЗК),
3. Разработка новых принципов сканирования объектов НК и ТД:
 - электронного с применением фазированных антенных решеток (ФАР);

- устройств сканирования для голографических систем НК.
- 4. Разработка информационных технологий НК и ТД:
 - разработка цифровых методов управления зондированием объекта контроля;
 - разработка цифровых, в том числе корреляционных методов обработки и регистрации сигналов, и программного обеспечения на их основе и высокоразрешающего цифрового томосинтеза;
 - разработка адаптивных систем НК и ТД с использованием нейронных сетей в блоках принятия решения;
 - применение спутниковых технологий НК и ТД;
 - применение современных методов численного моделирования и цифровой фильтрации;
 - разработка систем управления технологическими процессами.
- 5. Разработка цифровых средств и программного обеспечения (дефектоскопы, толщиномеры, тензометры, томографы, голографические системы и др.).

В докладе приводятся примеры эффективного применения новых методов и средств НК и ТД, комплексирования методов и создания систем на основе инновационной стратегии.

РАБОТЫ СГАУ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В.

СГАУ им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Одной из важнейших задач обеспечения безаварийной эксплуатации изделий аэрокосмической техники является все более широкое внедрение методов и приборов неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД). Существует необходимость в режиме реального времени отслеживать параметры и процессы в таких сложных технических объектах, какими являются летательные аппараты и их энергетические установки. В настоящее время ни один технологический процесс производства и эксплуатации изделий аэрокосмической техники не обходится без НК и ТД. При создании приборов и систем НК и ТД используются современные информационные технологии, решаются сложнейшие задачи моделирования. Все вышесказанное определяет широкий интерес ученых и сотрудников Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета)

(СГАУ) к решению задач НК и ТД. С решением указанных задач связана деятельность почти всех факультетов СГАУ: летательных аппаратов, двигателей, эксплуатации аэрокосмической техники, металлургии, радиотехники, информатики.

В докладе кратко представлены основные направления научных исследований ученых СГАУ в области НК и ТД.

Прежде всего, следует отметить работы в области виброакустического контроля и диагностики. В этой области все большее применение находят бесконтактные методы контроля, основанные на использовании лазерной техники. Кроме того, что они не вносят в рабочий процесс исследуемых объектов искажений, связанных с дополнительной присоединенной массой, лазерные методы позволяют проводить исследования в широком температурном диапазоне (в частности, в зоне высоких температур), в случаях, когда внедрение контактных датчиков затруднено. В качестве примера можно привести использование лазерной виброметрии при проведении исследования такой высокотемпературной системы двигателя внутреннего сгорания, как каталитический коллектор выхлопных газов. Применение методов технической диагностики в этом случае позволило оптимизировать конструкцию каталитического коллектора, снизить вибрацию и излучаемый шум.

Лазерные методы виброакустической диагностики конструкций в СГАУ получили развитие на базе использования спекл-интерферометрии. В докладе представлены вопросы их применения для определения собственных частот и форм колебаний высоконагруженных деталей и узлов двигателей летательных аппаратов. Разработаны методы статистической обработки серий спекл-изображений вибрирующих объектов, положенные в основу помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра.

Развивается направление, связанное с диагностикой технического состояния насосных агрегатов по излучаемому ими шуму (звуковым полям). В качестве диагностического признака используется информация о модуле и направлении вектора интенсивности в различных точках звукового поля.

Большое внимание ученые университета уделяют разработке приборов неразрушающего контроля и технической диагностики.

Дисперсные жидкости являются двухфазными средами «жидкость – взвешенные частицы», называемыми также дисперсными системами и мутными средами. Дисперсные смазочные, гидроприводные, топливные и другие рабочие жидкости широко применяются в машиностроении, авиации, энергетике, микроэлектронике, железнодорожном транспорте и других областях. Важной проблемой обеспечения технологической эффективности является соблюдение норм чистоты рабочих жидкостей по гранулометрическим параметрам – размерам и концентрации взвешенных частиц. Гранулометрический контроль смазочных и других рабочих жидкостей актуален в трибологии (триботехнике) в процессах трения, износа и смазки твердых тел, взаимодействия твердых тел при их относительном перемещении.

В качестве примера приборов НК и ТД, разработанных в СГАУ, можно привести вихретоковый датчик для контроля параметров дисперсных сред.

В настоящее время многие предприятия и организации работают с жидкими веществами — это нефтяные и пищевые промышленные предприятия, тепловые сети и другие организации, оказывающие услуги по хранению и переработке жидких веществ. На таких производствах остро стоит вопрос о точном измерении уровня жидкости в резервуаре и передача этой информации вычислительной системе. Перспективным направлением в разработке приборов измерения уровня признана низкочастотная акустика. Созданная в СГАУ переносная акустическая установка позволила изучать акустические сигналы и измерять расстояние до границы сред до 500 м. В ходе работ был также создан стенд для проведения испытания уровнемеров.

С середины 80-х годов на регулярных пассажирских линиях начали эксплуатироваться воздушные суда (ВС), в конструкциях которых нашли широкое применение (около 30 % по площади фюзеляжа и крыла) сотовые конструкции (СК). Однако анализ статистики отказов и неисправностей отечественных типов ВС показал, что с увеличением наработки наблюдается рост количества дефектов СК. Также следует отметить, что до 80 % отказов и неисправностей возникают из-за разрушения клеевого соединения элементов сотовых конструкций и нарушения герметичности последних. Предложен метод диагностирования авиационных сотовых конструкций на основе вейвлет-анализа сигналов вибрации. Разработанный метод находится в опытной апробации в ООО АК «Волга-Днепр», а также используется в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению «Эксплуатация и испытания авиационной и ракетно-космической техники».

Среди известных методов определения деформационного состояния лопаток работающих турбомашин важное место занимает оптоэлектронный дискретно-фазовый метод (ОЭДФМ). В СГАУ создан датчик, предназначенный для реализации оптоэлектронного дискретно-фазового метода, в котором конструктивно объединены оптоэлектронный и вихретоковый первичные преобразователи. Разработанный комбинированный первичный преобразователь (КПП) применялся в экспериментальных работах по апробированию и отладке аппаратных средств ОЭДФМ определения деформаций лопаток. На базе КПП была построена система измерения виброперемещений изделий из композитных материалов, которая позволила обеспечить необходимую длительность непрерывных испытаний вне зависимости от электропроводности материала и уменьшить трудоемкость работ по сравнению с тензометрированием. Полученные результаты позволяют предполагать, что разработанный комбинированный первичный преобразователь и оптоэлектронный способ определения деформационных параметров лопаток найдут свое место в арсенале аппаратно-методических средств исследования, диагностики и контроля лопаточных венцов турбоагрегатов,

измерения зазоров и виброперемещений различных подвижных узлов и механизмов.

Нельзя не упомянуть и о других направлениях работы ученых СГАУ в области НК и ТД: использование приемников воздушных давлений летательного аппарата как средства диагностики аварийных ситуаций в сложных метеоусловиях, математическое моделирование распространения направленных импульсных сигналов в системах диагностики сред и объектов, методики и устройства для диагностики и отбраковки полупроводниковых диодов, электрофизическая диагностика микросхем и многие другие.

Одной из задач, которые СГАУ предстоит решать в ближайшем будущем - обучение и аттестация специалистов по методам неразрушающего контроля и технической диагностики.

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СТРУКТУРНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЙ

Горкунов Э.С.
Институт машиноведения УрОРАН, Екатеринбург, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Стеблев Ю.И., Быков Д.Е., Сусарев С.В., Михайлов В.Ф.
СамГТУ, Самара, Россия

Проектирование и оснащение критически важных объектов структурированными системами мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС) предусматривается Концепцией федеральной системы мониторинга критически важных и потенциально опасных объектов промышленной инфраструктуры, одобренной распоряжением правительства РФ № 14-З от 27.08.2005 г. Концепция разработана во исполнение утвержденного президентом РФ решения совместного заседания Совета безопасности РФ и президиума государственного совета РФ (октябрь 2003 г.).

Основанием для идентификации промышленного объекта как критически важного или потенциально опасного является постановление правительства РФ № 304 от 21.05.2007 г. «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

К таким объектам в первую очередь относятся взрывоопасные производства: нефтеперерабатывающие, нефтехимические и нефтегазодобывающие предприятия.

Основным нормативно-техническим документом РФ, регламентирующим общие требования к СМИС, является ГОСТ 3 221.12–2005 [1] который устанавливает:

- категории потенциально опасных объектов, зданий и сооружений, подлежащих оснащению структурированными системами мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений;
- основные требования к построению СМИС;
- перечень функций СМИС, обеспечивающих решение задач безопасности объектов;
- порядок информационного сопряжения данных от СМИС с единой дежурно-диспетчерской службой города, района (ЕДДС);
- порядок проведения испытаний и приемки в эксплуатацию СМИС.

Основной задачей СМИС является [2, 3] автоматический мониторинг в режиме реального времени критически важных для безопасности персонала и окружающей среды:

- параметров технологических систем;
- систем безопасности;
- противопожарной защиты;
- инженерных систем жизнеобеспечения;
- систем связи и управления в кризисных ситуациях;
- мониторинг состояния несущих конструкций опасного производственного объекта.

Каждая из перечисленных систем, которые должны контролироваться СМИС, представляют собой сложные производственно-технические и организационные структуры, содержащие большое число агрегатов, технологического оборудования, трубопроводных коммуникаций, средств управления, защиты и обеспечения безопасности.

Поэтому проектирование СМИС должно производиться на основе строгого логического структурирования огромного объема информации по комплексу установки – объекту мониторинга: проектной документации на саму установку и АСУТП, требований к безопасности и метрологическому обеспечению, нормативно-технической документации и т.п. Основные этапы и принципы проектирования СМИС опасных производственных объектов сведены в структурную схему (рис. 1), отражающую иерархию основных задач проектирования и их взаимодействие в процессе создания системы мониторинга.

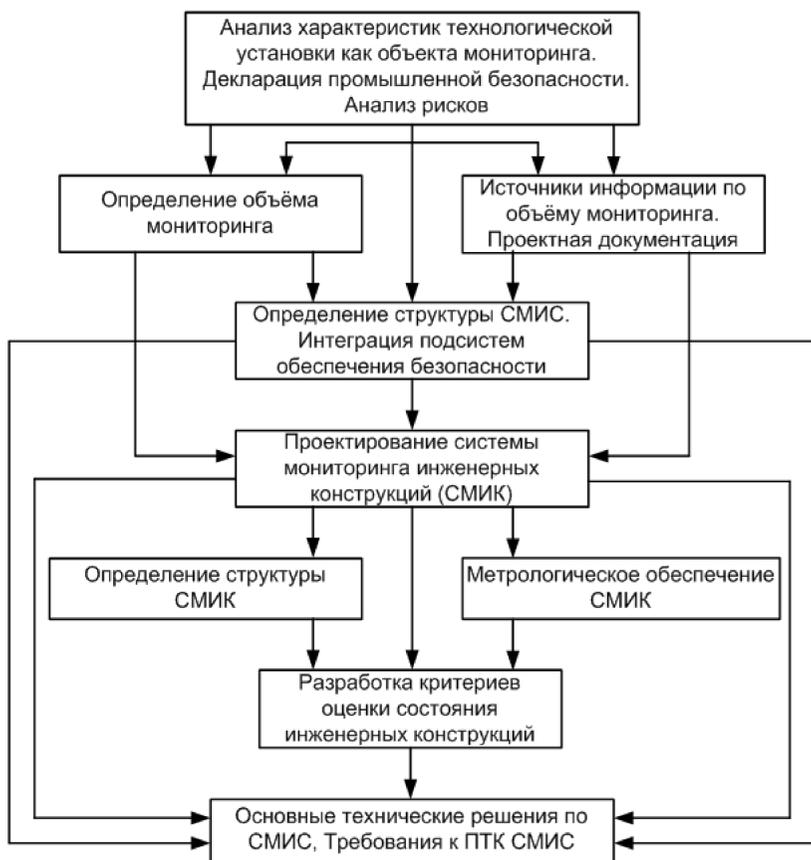


Рис. 1. Этапы проектирования систем диагностического мониторинга инженерных сооружений (СМИС) опасных производственных объектов

В докладе рассмотрено содержание каждого этапа проектирования СМИС и возможности формализации этого процесса.

Одной из основных подсистем СМИС является система мониторинга состояния несущих конструкций и оборудования технологической установки (СМИК), включающая:

- подсистему непрерывного мониторинга технологического оборудования;
- подсистему периодического мониторинга оборудования;
- подсистему норм и критериев оценки технического состояния оборудования;
- экспертную систему принятия решений по результатам мониторинга.

Непрерывный и периодический мониторинг должны носить комплексный характер, включающий применение соответствующих методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики. В докладе определено взаимодействие между подсистемами непрерывного и периодического мониторинга СММК, разработаны структуры подсистем норм и критериев оценки состояния оборудования, экспертной системы принятия решений по результатам мониторинга.

Проектирование системы мониторинга завершается разработкой основных технических решений, требований к программно-техническому комплексу (ПТК) СММК и определением режимов функционирования.

Доклад подготовлен на основе опыта проектирования СММК комплекса установки каталитического риформинга (ССР) НПЗ, г. Новокуйбышевск, Самарской обл.

Литература

1. **ГОСТ Р 22.1.12–2005.** «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования».
2. **Методика** мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Общие положения и требования. М., 2009.
3. **СА 03-002–05.** Стандарт ассоциации. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования. М., Ростехэкспертиза, 2005.

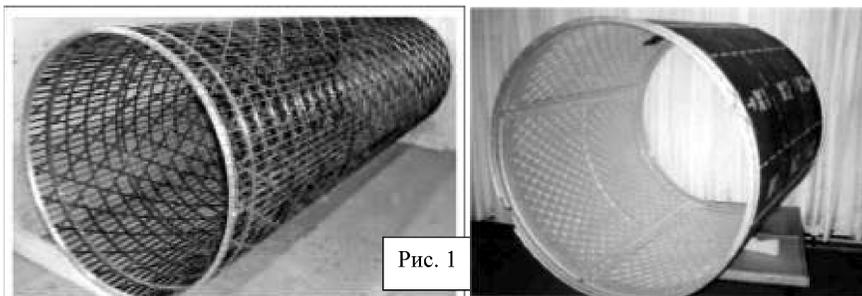
КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОПАРАМЕТРОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СПЛОШНОСТИ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Будадин О.Н., Кутюрин Ю.Г., Филиппенко А.А.

*ОАО «ЦНИИ Специального машиностроения»
Хотьково, Московской обл., Россия*

Сетчатые оболочки из полимерных композиционных материалов в последнее время находят широкое применение и являются перспективными во многих отраслях промышленности (машиностроении, авиационной, космической), так как обеспечивают минимальный вес при заданном значении прочности (рис. 1) [1].

Чем сложнее конструкция по форме и применению разных материалов, тем труднее подобрать и разработать технологический процесс



ее изготовления, что увеличивает вероятность появления различных дефектов. Для изделий ответственного назначения, типа сетчатые структуры, операции неразрушающего контроля являются обязательными.

Как показали проведенные исследования, наиболее часто встречающимися опасными макродефектами сетчатых структур из ПКМ являются дефекты типа нарушения сплошности, например расслоения, непроклеи, трещины в зонах соединения сетчатых структур с оболочкой и в самих ребрах. Кроме того, возможны дефекты на уровне микроструктуры: зоны повышенной пористости. Повышенную опасность представляют расслоения берега которых соприкасаются.

При разработке метода неразрушающего контроля необходимо учитывать ряд факторов, связанных со спецификой данного типа изделий – сложной пространственной структурой: большая протяженность структур сетчатой конструкции (достигает в длину несколько километров), наличие в конструкции «слипнутых» дефектов и т.п.

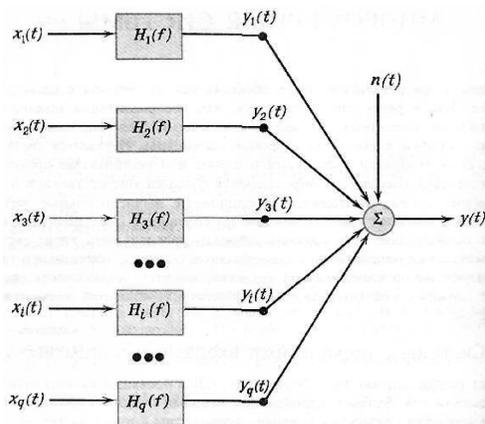


Рис. 1а. Структурная схема обработки многопараметрового контроля

Наименование области применения (дефекта)	Наименование метода контроля		Информационный параметр	Производительность контроля, м ² /ч, ориентировочно	Характеристики выявляемых дефектов	
					Раскрытие, мм	Протяженность, мм
Нарушение сплошности между ребрами и оболочкой	1.1.	Активный тепловой контроль	Температура (тепловое поле)	0,6	0,15 и более	10 и более
Дефекты типа трещин в ребрах (раскрытый дефект)	2.2.	Ультразвуковой контроль поверхностными волнами	Время прохождения УЗ сигнала между приемным и передающим ультразвуковыми преобразователями, установленными на различные участки ребер по длине	2,1	0,1 и более	15 и более
	2.3.	Ультразвуковой теневой (квазитеневой) контроль (автоматизированные)	Амплитуда и время прохождения УЗ сигнала между приемным и передающим ультразвуковыми преобразователями	2,1	0,1 и более	15 и более
Дефекты типа трещин в ребрах («слипнутый» дефект)	3.1	Метод ультразвуковой термографии	Акустическое излучение + температурное поле	0,6	0,001	5–7 и более
Дефекты в общем пакете материалов (оболочка + ребро)	4.1.	Ультразвуковой теневой контроль со специальной системой ориентации акустических преобразователей	Амплитуда и время прохождения УЗ сигнала между приемным и передающим ультразвуковыми преобразователями	0,1	0,1	15 и более

Наименование области применения (дефекта)	Наименование метода контроля		Информационный параметр	Производительность контроля, м ² /ч, ориентировочно	Характеристики выявляемых дефектов	
					Раскрытие, мм	Протяженность, мм
Дефекты типа трещин в ребрах (раскрытый дефект)	5.1	Автоматизированный рентгеновский контроль портативной аппаратурой	Интенсивность рентгеновского излучения (чувствительность 1,5 %)	4-5	0,15 и более	3 и более (мертвые зоны отсутствуют)
Дефекты типа трещин в ребрах (раскрытый дефект)	6.1	Полуавтоматизированный радиоволновый контроль портативной аппаратурой	Информационные характеристики	0,5	0,1 и более	15 и более

Технология контроля и соответствующие технические средства должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Выявление дефектов типа нарушения сплошности в любом месте конструкции.

2. Достаточно большая производительность контроля, чтобы обеспечить обследование конструкции в разумные промежутки времени. Например, контроль одновременно больших площадей конструкции.

3. Максимально возможное исключение из процесса контроля оператора.

Это обуславливает применение методов контроля, реализующих обследование одновременно достаточно большой площади поверхности.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что одним методом практически невозможно выявить все дефекты типа нарушения сплошности.

В табл. 1 приведены исследуемые методы неразрушающего контроля и их показатели назначения в зависимости от областей их применения.

Совместная обработка результатов контроля включает обработку 2-х мерных массивов информации информационных параметров (полученных

по каждому методу) для повышения достоверности контроля, обеспечение выявления дефектов во всех элементах конструкции и формирования итоговых результатов. В частности, этапами комплексной обработки являются: корреляционная обработка двумерных массивов информации, полученных теми методами, которые контролируют дефекты в одинаковых элементах конструкции; одновременное наложение результатов контроля (дефектограмм) по каждому методу на чертеж изделия и т.п.

В докладе приведены результаты исследований. Показано, что применение комплексного контроля различными методами с многопараметровой обработкой позволит с достаточной производительностью и достоверностью выявить дефекты типа нарушений сплошности в сетчатых структурах из ПКМ.

Выше представлены результаты исследований.

Литература

1. **Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И.** Анизотропные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике. Композиты и наноструктуры, № 3, 2009. С. 38 – 49.

2. **Будадин О.Н., Кутюрин В.Ю., Борисенко В.В.** Автоматизированный ультразвуковой неразрушающий контроль сложнопрофильных изделий из полимерных композиционных материалов. Контроль. Диагностика, 2007, № 4. С. 19 – 22.

3. **Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В.** Тепловой неразрушающий контроль изделий. М., Наука, 2002. 472 с.

4. **Салихов З.Г., Будадин О.Н., Ишметьев Е.Н., Абрамова Е.В.** и др. Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения. М.: ИД МИСиС, 2008. 476 с.

5. **Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.** Диагностика безопасности. Тепловой контроль. Под общей редакцией академика РАН Ключева В.В. М.: Издательский дом Спектр, 2011. 171 с.

ТЕХНОГЕННАЯ ДИАГНОСТИКА

СЕКЦИЯ 1. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции: Горкунов Э.С., Шелихов Г.С.

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПАРА- И ДИАМАГНИТНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

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

Задача неразрушающего контроля качества изделий из пара- и диамагнитных материалов является актуальной для многих отраслей промышленности. В Институте машиноведения УрО РАН разработан способ, позволяющий выявлять дефекты сплошности в электропроводящих изделиях из пара- и диамагнитных материалов, определять их количество, пространственное положение, геометрические размеры. Этот способ основан на том, что если в объекте контроля имеются области, отличающиеся по своим электрическим характеристикам от основного металла, то плотность пропускаемого через объект электрического тока будет изменяться вблизи этих неоднородностей. Соответственно будет изменяться и напряженность генерируемого током магнитного поля, что можно зафиксировать с помощью магниточувствительных преобразователей.

В процессе контроля через контролируемое изделие пропускают электрический ток, сканируют поверхность изделия магниточувствительным преобразователем (например, феррозондом), регистрируют распределение по поверхности изделия напряженности магнитного поля, генерируемого этим током, визуализируют магнитный образ поверхности контролируемого изделия на экране монитора (рис. 1). Полученный магнитный образ сравнивают с заранее полученным магнитным образом поверхности контрольного образца, не содержащего дефекты (рис. 2). По полученным в результате сравнения отклонениям, представляющим собой магнитные образы выявленных дефектов (рис. 3), судят о количестве и местах расположения дефектов в контролируемом изделии. Затем магнитные образы дефектов сравнивают с групповыми магнитными образами дефектов, имеющих известные параметры, и по результатам сравнения делают выводы о параметрах выявленных дефектов.

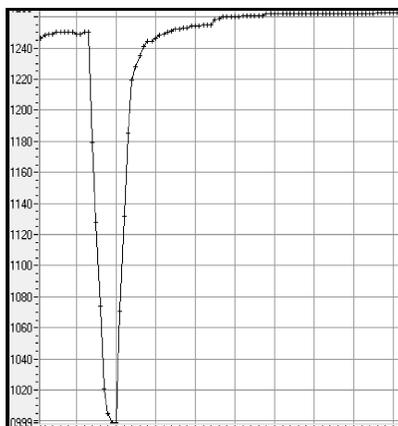


Рис. 1

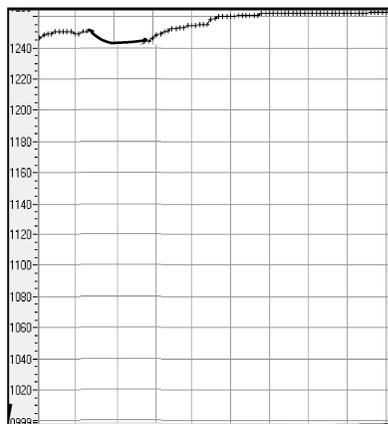


Рис. 2

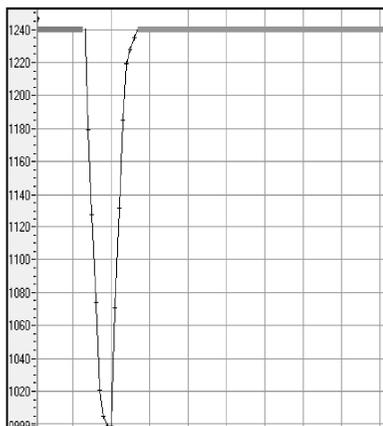


Рис. 3

Способ апробирован на контроле дефектов плоскости сварных соединений листов из алюминиевых сплавов. Выявляются дефекты плоскости швов в виде рыхлот, непроваров по длине и глубине шва, сквозных и глухих отверстий, продольных трещин, ферромагнитных включений.

Работа выполнена при частичной поддержке интеграционного проекта УрО РАН и СО РАН 09-С-1-1011 и междисциплинарного проекта УрО РАН 09-М-13–2001.

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ЗОНЕ КОНТРОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ П-ОБРАЗНЫХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Василенко О.Н., Костин В.Н., Бида Г.В.

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В докладе представлен материал по 3D-моделированию методом конечных элементов магнитного поля и индукции в локально намагничиваемых ферромагнитных объектах и даются рекомендации по оптимизации

формы и размеров П-образных приставных преобразователей, а также показаны способы совершенствования конструкции двухполюсных цилиндрических электромагнитов.

В магнитной структурографии широко используются приборы с приставными намагничивающими устройствами. Наиболее распространены приставные П-образные электромагниты. В последние годы в Институте физики металлов УрО РАН разработаны методы и средства (магнитные мультитестеры ММТ, программно-аппаратная система СИМТЕСТ) для определения магнитных свойств вещества контролируемых объектов при их локальном намагничивании, в том числе П-образными электромагнитами. Поскольку определение магнитных свойств вещества предполагает измерение магнитного потока (магнитной индукции) и внутреннего магнитного поля в контролируемом объекте, то исследование топологии поля и индукции необходимо для правильного выбора конструкции и размеров намагничивающего устройства и для определения оптимальных мест расположения первичных преобразователей поля и потока.

Основным исследуемым параметром модельных расчетов являлась магнитная индукция (плотность потока). Для примера на рис. 1 приведено распределение магнитного потока в нейтральной плоскости при увеличении ширины пластины от $L_z = 28$ мм (что, равно ширине полюсов электромагнита) до $L_z = 228$ мм. Видно, что при намагничивании приставным П-образным электромагнитом массивный ферромагнитный объект в межполюсном пространстве намагничивается очень слабо вследствие бокового рассеяния магнитного потока.

Анализ результатов моделирования показывает, что:

– пространственное распределение поля и индукции, создаваемое в массивных ферромагнетиках приставным П-образным электромагнитом,

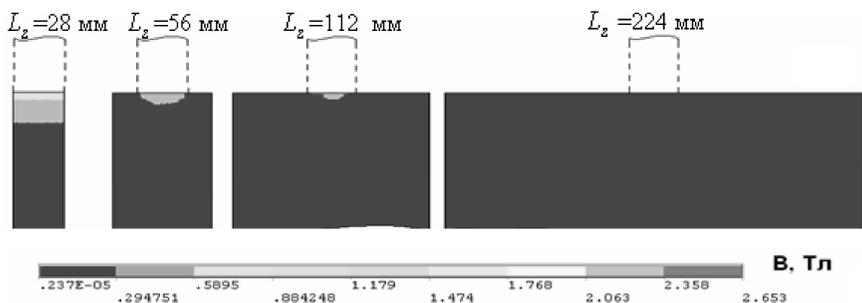


Рис. 1. Распределение магнитной индукции при вариации ширины ферромагнитной плиты L_z

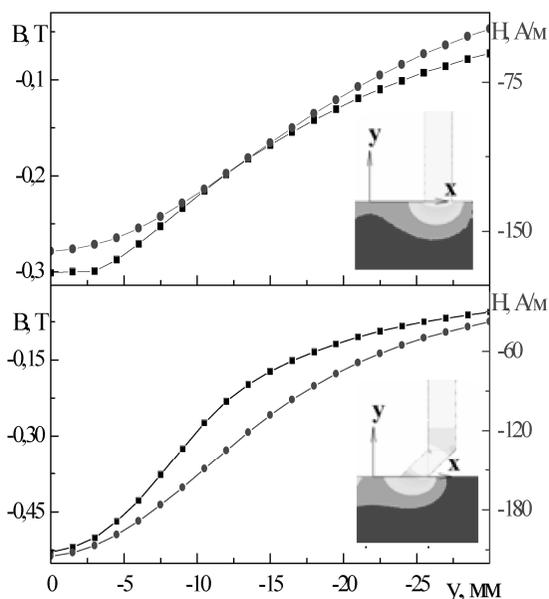


Рис. 2. Зависимости тангенциальных составляющих поля и индукции от глубины в нейтральном сечении

слабо зависит от магнитных свойств намагничиваемых объектов и в основном определяется геометрическими размерами и формой приставного электромагнита и намагничиваемого объекта;

- боковое рассеяние существенно затрудняет намагничивание массивных объектов вблизи нейтральной плоскости электромагнита;

- уменьшение бокового рассеяния магнитного потока наиболее эффективно достигается путем уменьшения расстояния между полюсами П-образного электромагнита;

- использование встречно направленных фигурных наконечников позволяет увеличивать плотность магнитного потока как вблизи поверхности, так и на достаточно большой глубине массивного объекта (рис. 2).

В свою очередь двухполюсной цилиндрической электромагнит является осесимметричной конструкцией и не имеет бокового рассеяния. Моделированием пространственного распределения магнитного потока, создаваемого цилиндрическим электромагнитом в массивном объекте, установлено, что для концентрации магнитного потока целесообразно использовать наконечник-вкладыш к внешнему полюсу. Путем оптимального выбора диаметров внутреннего и внешнего полюсов электромагнита, а также формы и размеров вставного наконечника можно добиться уменьшения эффективного расстояния между полюсами и, как следствие, необходимой величины тангенциальной составляющей магнитного потока в контролируемой зоне намагничиваемого объекта.

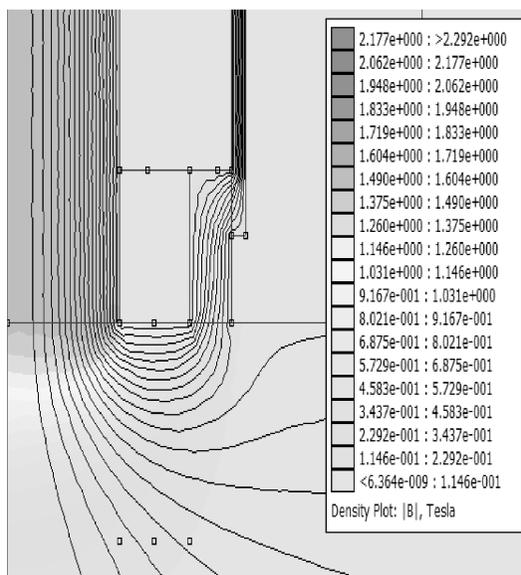


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в объекте контроля

На рис. 3 представлено распределение магнитного потока в объекте. Видно, что основная часть магнитного потока не выходит за границы внешнего полюса. При диаметре внутреннего полюса 16 мм и межполюсном расстоянии 5 мм значение тангенциальной составляющей магнитной индукции в межполюсном пространстве вблизи поверхности превышает 1 Т, а на глубине 5 мм индукция меняется в пределах 0,5...0,3 Т, что значительно превышает индукцию в межполюсном пространстве П-образного электромагнита.

Сменные насадки на внутренний и внешний полюса цилиндрического электромагнита позволяют использовать один преобразователь на объектах с различной кривизной поверхности.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект МК-2716.2010.8) и гранта Президиума РАН (проект 09-П-2-1001).

К МАГНИТНОМУ КОНТРОЛЮ УРОВНЯ ЗАТЯЖКИ СТАЛЬНЫХ ШПИЛЕК И БОЛТОВ КОРПУСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Загидулин Р.В.¹, Загидулин Т.Р.²

¹ООО НТЦ «Спектр», Уфа, Россия,

²ГОУ ВПО УГАТУ, Уфа, Россия

Для исключения раскрытия стыков при подаче рабочего давления, в узлах корпусного энергетического оборудования, содержащих множество

стальных болтов и шпилек, контролируют уровень их затяжки. Существующие методы оценки уровня механического напряжения металла стальных болтов и шпилек имеют недостатки, связанные с невысокой точностью измерений и требованием специальных условий контроля, трудно осуществимых в условиях производства [1, 2].

В связи с этим был разработан физический метод контроля уровня затяжки стальных шпилек и болтов корпусного оборудования, во многом лишенный указанных недостатков. Метод основан на измерении величины магнитного параметра, зависящего от уровня внутренних и внешних механических напряжений металла [3].

В работе [3] было получено аналитическое выражение для зависимости величины остаточной намагниченности металла J_r стального изделия от величины внутренних механических напряжений σ :

$$J_r(\sigma) = J_{r0} + \frac{\lambda_s J_{r0}}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma, \quad (1)$$

где χ – магнитная восприимчивость; λ_s – магнитоотрицательная насыщения; J_s – намагниченность насыщения металла; J_{r0} – остаточная намагниченность металла в ненагруженном состоянии.

Величина остаточной намагниченности металла пропорциональна напряженности поля остаточной намагниченности над поверхностью стального изделия [3], поэтому, измеряя это магнитное поле, можно косвенно оценить величину механических напряжений металла.

Данный метод контроля был реализован в индикаторе механического напряжения металла ИН-01, который предназначен для измерения уровня затяжки стальных шпилек подогревателей высокого давления (ПВД).

Преимуществами индикатора механического напряжения металла ИН-01 являются:

- возможность контроля уровня затяжки на любом доступном месте стальной шпильки (торец, боковая поверхность стержня шпильки, болта);
- отсутствие ограничений по линейным размерам контролируемой стальной шпильки, болта, не требуется наличие стандартного образца;
- простота методики измерения и приемлемая для практики точность контроля уровня затяжки стальной шпильки, болта.

В 2006 г. были проведены цеховые испытания индикатора ИН-01 на энергоблоке № 3 Кармановской ГРЭС ОАО «Башкирэнерго», при контроле уровня затяжки стальных шпилек ПВД-6, остановленных на плановый ремонт. В процессе испытаний было проконтролировано более 200 стальных шпилек ПВД (рис. 1).

Контроль с помощью индикатора механического напряжения металла ИН-01 выявил наличие как слабо затянутых, так и чрезмерно затянутых стальных шпилек ПВД, при этом была установлена значительная неоднородность по уровню затяжки стальных шпилек (рис. 1, кривые «без кон-

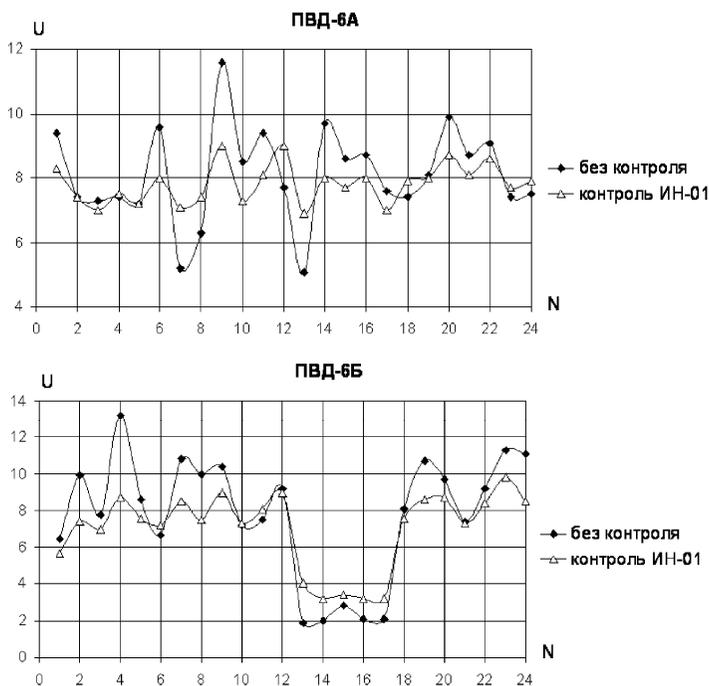


Рис. 1. Показания индикатора механического напряжения металла ИН-01 на стальных шпильках ПВД

троля»). На чрезмерно затянутых стальных шпильках ПВД показания индикатора ИН-01 имеют максимальное значение, на слабо затянутых стальных шпильках – минимальное значение.

После ручной корректирующей подтяжки слабо затянутых стальных шпилек и ослабления чрезмерно затянутых шпилек был проведен их повторный контроль индикатором механического напряжения металла ИН-01, который показал примерно одинаковый уровень затяжки стальных шпилек ПВД и отсутствие среди них явно слабо затянутых и чрезмерно затянутых шпилек (рис. 1, кривые «контроль ИН-01»).

Последующие гидравлические испытания ПВД-6 прошли успешно, без разрушения проконтролированных стальных шпилек.

Для проверки достоверности результатов контроля величины механических напряжений металла стальных шпилек индикатором ИН-01 был проведен также их дополнительный контроль магнитным структуроскопом типа КРМ-Ц, при котором показания магнитного структуроскопа оказались в полном согласии с результатами контроля индикатором механического напряжения металла ИН-01.

Следует заметить, что в настоящее время ПВД-6 КарГРЭС успешно прошел межремонтный период эксплуатации. В то же время, после планового ремонта ПВД-8 в 2009 г. в процессе бесконтрольной затяжки стальных шпилек, при последующих гидравлических испытаниях, избежать обрыва и разрушения ряда стальных шпилек не удалось.

Литература

1. Хусаинов А.Ш., Кузьмин Ю.А., Овечкин А.Ю. Контроль осевого усилия болта и момента затяжки в резьбовых соединениях при экспериментальных исследованиях. Контроль. Диагностика, 2011 г., № 1. С. 65 – 68.

2. Бобренко В.М., Рудаков А.С. Исследование усилий в резьбовых соединениях акустическим тензометрированием. Дефектоскопия, 1986 г. № 7. С. 11 – 14.

3. Загидулин Т.Р. Изменение напряженности поля остаточной намагниченности металла при деформации стального изделия. 6-я Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых с международным участием. г. Уфа, 15 – 18 февраля 2011 г.

К ВОПРОСУ О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ДИАГНОСТИКЕ СТЕПЕНИ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ СТАЛЕЙ

Бусько В.Н.¹, Венгринович В.Л.¹, Макаров А.В.², Саврай Р.А.²

¹*Институт прикладной физики НАНБ, Минск, Беларусь;*

²*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

В настоящее время диагностика усталостной деградации металла все чаще входит в число необходимых процедур при прогнозировании эксплуатационной долговечности конструкции. В докладе рассматривается вопрос о возможности контроля усталостной деградации, обусловленной воздействием на образец двух видов циклического нагружения (одноосного отнулевого циклического растяжения и циклического изгиба), с помощью магнитошумового метода на примере сталей У10, Ст3 и ВНС-2. Экспериментальные исследования усталостной деградации и ее количественная оценка осуществлялись с помощью измерения интенсивности магнитного шума (МШ), а также специальной обработки полученных данных, основанной на вычислении разницы значений МШ при ортогональных положениях преобразователя Баркгаузена (ПБ). Исследования выполнялись на образцах, изготовленных из высокоуглеродистой перлитной стали У10 (образцы прямоугольного сечения с головками), высокопрочной ВНС-2 (образцы в виде балки) и малоуглеродистой стали Ст3 (образцы в виде пластины). Усталостное нагружение образцов из стали У10 осуществляли по схеме одноосного отнулевого растяжения на сервогидравлической испытательной установке Instron 8801 при числе циклов нагружения $N = 0; 10^5$;

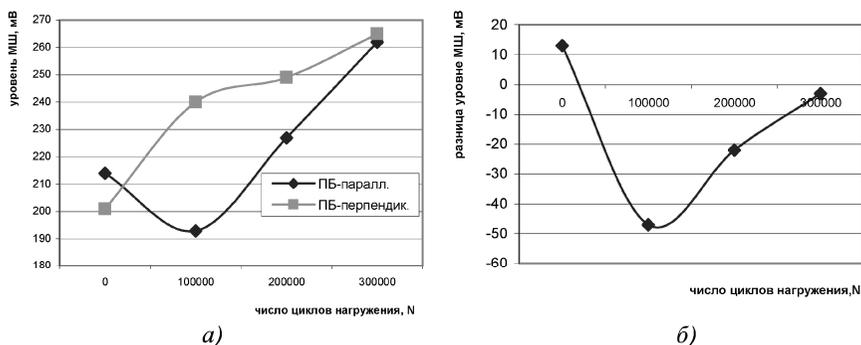


Рис. 1. Результаты измерения интенсивности МШ в образцах стали У10 в зависимости от количества циклов нагружения без обработки (а) и после обработки вычитанием (б)

2×10^5 ; 3×10^5 и величине напряжений $\Delta\sigma = 260$ МПа. В образцах из сталей Ст3 и ВНС-2 с помощью лабораторной изгибной установки создавались изгибные напряжения величиной $\Delta\sigma = 602$ МПа до максимальных значений $N = 6 \cdot 10^6$ циклов и $\Delta\sigma = 38$ МПа при $N = 1,087 \cdot 10^6$ циклов нагружения соответственно. Измерения интенсивности (G) магнитного шума (МШ) в образцах в зависимости от числа циклов N проводились на разработанных в ИПФ НАНБ магнитошумовых анализаторах. Результаты измерения МШ обрабатывались по алгоритму $G_{\perp} = G_{\parallel} - G_{\perp}$, затем строились кривые зависимостей МШ от N . На рис. 1, а, б представлены зависимости G и G_{\perp} от N для образцов стали У10 до (а) и после (б) обработки результатов измерения МШ методом вычитания сигналов.

Анализ зависимостей показывает, что с ростом N магнитный шум значительно изменяется. На кривой зависимости наблюдаются характерные точки, отражающие динамику усталостной деградации при росте количества циклов нагружения. С увеличением количества циклов нагружения N при перпендикулярном направлении поля перемагничивания относительно центральной оси образца интенсивность МШ плавно возрастает (тренд зависимости положительный), при параллельном – сначала падает, а затем возрастает. При этом чувствительность интенсивности МШ к N , основанная на использовании параметра, полученного операцией вычитания сигналов между ортогональными положениями ПБ, превышает чувствительность МШ без обработки сигналов. Принцип использования разности сигналов при взаимно перпендикулярном перемагничивании основан на идее о преимущественной роли сдвиговых напряжений при развитии усталостной деградации металла. Последние, в свою очередь, характеризуются величиной девиатора напряжений, который при плосконапряженном состоянии пропорционален величине разности главных напряжений.

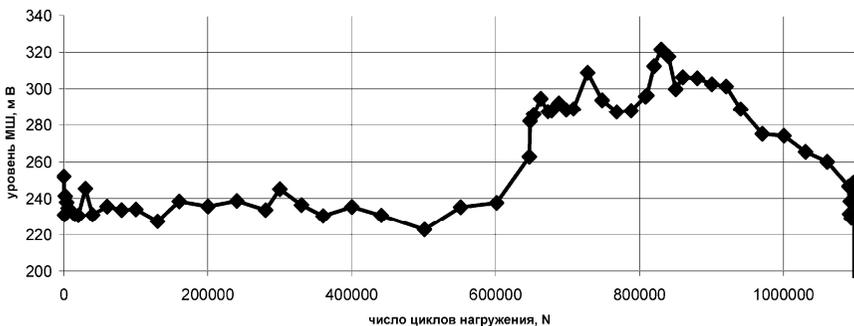


Рис. 2. Результаты измерения интенсивности МШ в зависимости от числа циклов изгибных знакопеременных нагружений на образце из стали Ст3 при перпендикулярном положении ПБ относительно его центральной оси

На рис. 2. приведены полученные на образце из стали Ст3 зависимости интенсивности МШ от N .

Из рис. 2 видно, что зависимость интенсивности МШ от N характеризует стадии упрочнения и разупрочнения стали в процессе накопления усталостной повреждаемости. При использовании в качестве информативного параметра для оценки усталостной деградации разницы между интенсивностями МШ, измеренными при ортогональных положениях ПБ, также получена высокая чувствительность.

Таким образом, параметры микромагнитного метода, в том числе с использованием специальной обработки полученных данных, основанной на вычислении разницы значений интенсивности магнитного шума при ортогональных положениях преобразователя Баркгаузена, обладают чувствительностью к накоплению усталостного повреждения при многоцикловой усталости и могут быть использованы при оценке усталостной деградации в сталях.

Работа выполнена при поддержке совместного проекта ИМАШ УрО РАН с ИПФ НАН Беларуси (№ 09-С-1-1002 и Т09УрО-003).

СКАНИРУЮЩИЙ КОЭРЦИТИМЕТР

Захаров В.А., Молин С.М., Зотов А.А., Леньков С.В.
*Физико-технический институт УрО РАН,
 Ижевск, Россия*

Доклад посвящен вопросам неразрушающего контроля свойств и напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий из ферромагнитных материалов по коэрцитивной силе. Контроль осуществляется передвижным (сканирующим) коэрцитиметром, состоящим из блока на-

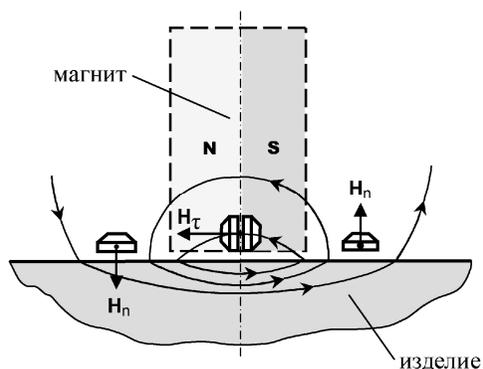


Рис. 1

магничивания и датчика. В отличие от существующих в практике магнитного контроля приставных (стационарных) коэрцитиметров указанные части аппаратуры разнесены в пространстве так, что при перемещении (сканировании) по поверхности контролируемого изделия намагничивающее устройство формирует в нем полосу с поперечной остаточной намагниченностью, а расположенный за ним измерительный датчик производит непрерывный отсчет параметра, пропорционального коэрцитивной силе участков намагниченной полосы [1]. Возможны также раздельные, следующие друг за другом, процедуры: формирование поля остаточной намагниченности изделия вдоль траектории контроля передвижным намагничивающим устройством и последующее непрерывное или локальное измерение коэрцитивной силы вдоль намагниченной полосы с помощью датчика. При необходимости, намагничивающее устройство и датчик могут быть соединены жестко или шарнирно между собой на заданном расстоянии друг от друга в направлении перемещения вдоль линии контроля.

Намагничивающее устройство коэрцитиметра выполнено двух-полюсным на основе электро- или постоянного магнита и снабжено катками для перемещения по поверхности изделия.

Намагничивание осуществляется в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения устройства. В результате в изделии образуется полоса с остаточной намагниченностью, при этом напряженность магнитного поля над поверхностью изделия в любом поперечном сечении полосы (за исключением небольших по величине начального и конечного участков) пропорциональна коэрцитивной силе материала в данном сечении.

Датчик коэрцитиметра (рис. 1) может быть построен на базе двух преобразователей (например, преобразователей Холла), измеряющих либо касательную составляющую напряженности остаточного магнитного поля H_t , либо нормальные составляющие этого поля, расположенных после-

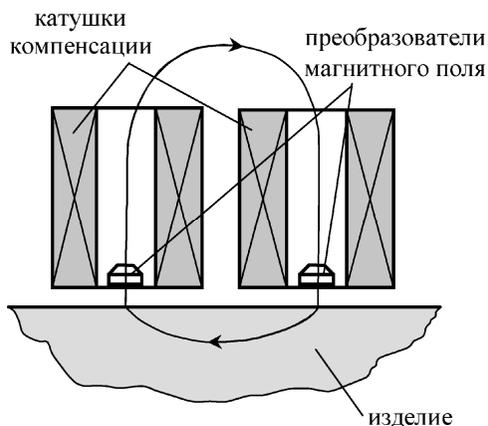


Рис. 2

довательно-встречно по отношению к однородным внешним магнитным полям. При фиксированном и неизменном расстоянии преобразователей от поверхности контролируемого изделия прибор может быть проградуирован непосредственно в единицах коэрцитивной силы, т.е. в А/см.

Благодаря отсутствию в магнитной системе датчика дополнительных (к изделию) ферромагнитных элементов зависимость показаний прибора от коэрцитивной силы является линейной, выходящей из начала координат. Кроме того, это позволяет также контролировать изделия с малыми значениями коэрцитивной силы (от десятых долей до единиц А/см), например, стали для электротехнических изделий и материалы магнитопроводов.

Датчик с двумя преобразователями магнитного поля может быть дополнительно снабжен катушками компенсации (рис. 2). Отсчет коэрцитивной силы в таком приборе производится по величине тока компенсации, необходимого для получения показаний преобразователей магнитного поля, равных нулю или заданному значению [2]. Данная конструкция датчика позволяет отстроиться от влияния непостоянства зазора между датчиком и поверхностью контролируемого изделия в заданном диапазоне зазоров (например, от 0 до 2 мм, или от 1 до 3 мм и т.п.).

Сканирующий коэрцитиметр может быть использован при контроле изделий различных размеров и конфигурации, однако наилучшие результаты достигаются на протяженных изделиях (трубы, балки и т.п.), а также на изделиях с развитой поверхностью (листы, пластины, оболочки и т.д.). Как и существующие приставные коэрцитиметры, предлагаемый прибор может использоваться для разбраковки ферромагнитных материалов по маркам, контроля полистной неоднородности материалов, напряженно-деформированного состояния ферромагнитных изделий при наличии однозначной зависимости коэрцитивной силы материала от указанных параметров.

Предлагаемый прибор имеет следующие преимущества и отличительные особенности по сравнению с существующими приставными коэрцитиметрами:

- возможность построения непрерывной картины распределения величины коэрцитивной силы вдоль заданной траектории на поверхности контролируемого изделия (при наличии в сканирующем датчике измерителя пройденного пути), в том числе пространственного распределения коэрцитивной силы по всей поверхности;

- простота документирования результатов измерений;

- возможность многократного съема показаний датчика как в режиме «точечного» измерения, так и в режиме сканирования вдоль намагниченной полосы изделия без разрушения его остаточной намагниченности;

- независимость показаний прибора от соотношения размеров изделий с развитой поверхностью (пластин, листов и т.п.) и «рабочей площадки» сканирующего датчика;

- меньшая энергоемкость устройства за счет применения постоянных магнитов для намагничивания изделий;

- возможность контроля (мониторинга) напряженно-деформированного состояния изделия, намагниченного вдоль выбранного направления передвижным намагничивающим устройством, по изменению остаточной намагниченности во времени.

Литература

1. **Безлюдько Г.Я., Захаров В.А.** Приставное устройство коэрцитиметра / Патент РФ на изобретение № 2327180, 20.06.2008.

2. **Захаров В.А., Молин С.М.** Приставное магнитное устройство / Патент РФ на полезную модель № 99188, 10.11.2010.

О ФОРМИРОВАНИИ МАГНИТНЫХ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ

Ульянов А.И., Чулкина А.А., Зыкина И.А.,
Волков В.А., Загайнов А.В.

Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, Россия

Доклад посвящен вопросам формирования магнитных гистерезисных свойств термически обработанных легированных углеродистых сталей. Известно, что при содержании углерода свыше 0,3 мас. % на зависимостях коэрцитивной силы от температуры отпуска $H_c(T_{отп})$ в районе $T_{отп} \approx 500$ °С появляется максимум, что ограничивает возможности коэрцитиметрических методов контроля качества отпуска углеродистых сталей. Степень

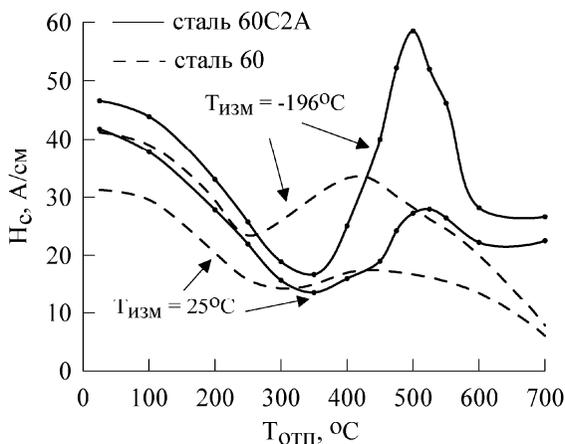


Рис. 1

проявления этого максимума возрастает с увеличением содержания в сталях углерода, что обусловлено в первую очередь возрастанием объемной доли цементита, коэрцитивность которого играет важную роль в формировании магнитных гистерезисных свойств термически обработанных простых углеродистых сталей [1]. Легирование может существенно изменять вид зависимостей $H_c(T_{отп})$ углеродистых сталей. В частности, было замечено, что легирование среднеуглеродистых сталей кремнием приводит к появлению на этих зависимостях ярко выраженного максимума.

Для выяснения особенностей формирования коэрцитивной силы среднеуглеродистых сталей, легированных кремнием, были приготовлены образцы высокочистых модельных сталей Ст. 60 и 60C2. После закалки от 850 °C в воду образцы были отпущены при $T_{отп} = 100...700$ °C. Методом механического сплавления были приготовлены также образцы легированного кремнием цементита состава Fe75C24Si1. Измерения магнитных свойств образцов проводили на вибрационном магнитометре в интервале температур от -196 до 300 °C.

Измерения показали, что после отжига при 500°C легированный кремнием (1 ат. %) цементит является сравнительно магнито жесткой фазой. Его H_c при комнатной температуре измерений составляет ≈ 210 А/см, а при температуре жидкого азота (-196 °C) – ≈ 500 А/см. Это означает, что даже небольшое по объему количество цементита может играть важную роль в формировании коэрцитивной силы сталей. На рисунке приведены зависимости $H_c(T_{отп})$ модельных сталей 60 и 60C2, измеренные при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Видно, что максимум зависимости $H_c(T_{отп})$ в области средних температур отпуска для стали 60C2 действительно выражен более ярко, чем для стали 60, особенно, если измерения проводятся

при температуре жидкого азота. Кроме того, максимум H_C для стали 60С2 сдвигается в область $T_{отп} \approx 500$ °С, в то время как для стали 60 он находится в районе ≈ 400 °С. Показано, что особенно большое влияние цементит, как магнитожесткая фаза, оказывает на формирование коэрцитивной силы сталей в области средних температур отпуска. Наблюдаемые изменения зависимостей $H_C(T_{отп})$ связываются со структурными превращениями, происходящими при отпуске в сталях, влиянием на них кремния.

Литература

1. Чулкина А.А., Ульянов А.И. Влияние магнитных свойств цементита на коэрцитивную силу высокоуглеродистых сталей после закалки и отпуска // ФММ, 2009. Т. 108. № 6. С. 581–588.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН (проект 09-П-2-1024)

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «СТАЛЬ 12Х18Н10Т – СТАЛЬ Ст3» И ЕГО КОМПОНЕНТ ПОСЛЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Туева Е.А., Горулева Л.С.,
Голубкова И.А., Каманцев И.С.
Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Широкое распространение многослойных композиционных материалов во многих областях промышленности ставит задачу обеспечения контроля напряженно-деформированного состояния изделий из этих материалов. С целью разработки методики для диагностики состояния изделий из композиционных материалов, в том числе состояния их компонент, на стадии изготовления и в процессе эксплуатации было проведено исследование изменений, происходящих в фазовом составе, механических и магнитных свойствах двухслойного композита «сталь 12Х18Н10Т – сталь Ст3», полученного сваркой взрывом, и его отдельных компонент после накопительной холодной прокатки с различной степенью деформации и при последующем одноосном упругопластическом растяжении.

Листовые заготовки из сталей Ст3 и 12Х18Н10Т, а также изготовленный из них композиционный материал были прокатаны с различной степенью деформации $\varepsilon_{пр}$. Величину $\varepsilon_{пр}$ рассчитывали по изменению поперечного сечения заготовки при прокатке. Для стали Ст3 $\varepsilon_{пр} = 0; 0,11; 0,20; 0,34; 0,49; 0,63$, для стали 12Х18Н10Т $\varepsilon_{пр} = 0; 0,19; 0,27; 0,36; 0,45; 0,57$. Величина $\varepsilon_{пр}$ для образцов из композита указана в таблице.

1. Степень деформации прокаткой композита и каждого слоя в пакете

$\varepsilon_{\text{пр}}$	0	0,14	0,28	0,40	0,56	0,62
$\varepsilon_{\text{нерж}}$	0	0,22	0,23	0,41	0,62	0,82
$\varepsilon_{\text{Ст3}}$	0	0,10	0,30	0,39	0,52	0,53

Следует отметить, что степень деформации компонент в композите отличается от $\varepsilon_{\text{пр}}$ для пакета в целом (см. табл. 1). Из полученных заготовок были вырезаны плоские разрывные образцы для проведения испытаний на растяжение. Длинная ось образцов совпадала с направлением прокатки.

Измерение магнитных характеристик проводили по схеме пермеаметра в приложенном магнитном поле до 60 кА/м. Погрешность измерения поля и индукции не превышала $\pm 3\%$. Полевую зависимость дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}$ определяли дифференцированием нисходящих ветвей предельных петель магнитного гистерезиса.

С увеличением степени деформации прокаткой коэрцитивная сила H_c и максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{макс}}$ стали Ст3 изменяются монотонно, что отражает чувствительность этих характеристик к изменению пластической деформации при прокатке.

Рентгеноструктурные исследования показали, что в исходном состоянии сталь 12X18H10T не содержит других фаз, кроме аустенита. Отсутствие в структуре стали заметного количества ферромагнитной составляющей подтверждается низкой величиной намагниченности в максимальном приложенном поле (3 мТл). С увеличением $\varepsilon_{\text{пр}}$ намагниченность насыщения M_s и $\mu_{\text{макс}}$ монотонно возрастают, что свидетельствует об увеличении магнитоупорядоченной фазы. Это позволяет использовать M_s и $\mu_{\text{макс}}$ для оценки структурных изменений коррозионно-стойкой стали 12X18H10T после холодной прокатки. Согласно рентгеновским данным, при максимальной величине $\varepsilon_{\text{пр}}$ количество образовавшегося α' -мартенсита достигает 96%. Однако, при этом $M_s = 0,88$ Тл, что, согласно [1], соответствует содержанию в структуре стали около 60% мартенсита. Поскольку рентгенофазовый метод позволяет анализировать только поверхностный слой, то из этих измерений следует, что степень деформации прокаткой на поверхности больше, чем в среднем по сечению образца. Коэрцитивная сила стали 12X18H10T монотонно зависит от степени деформации прокаткой. Это, по-видимому, связано с ростом размеров выделений α' -фазы при увеличении $\varepsilon_{\text{пр}}$ и переходом их в многодоменное состояние.

Коэрцитивная сила композита «сталь 12X18H10T – сталь Ст3» однозначно изменится с изменением $\varepsilon_{\text{пр}}$, что позволяет использовать ее для оценки степени холодной деформации прокаткой подобных композиционных материалов. Абсолютные значения магнитных характеристик пакета имеют промежуточные значения между магнитными характеристиками его отдельных компонент.

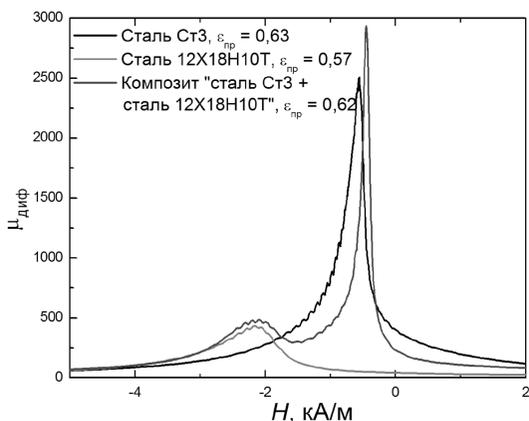


Рис. 1. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости исследованных материалов при максимальных степенях деформации

Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости композита и его компонент после прокатки на максимальную степень представлены на рис. Как видно, на кривой $\mu_{\text{диф}}(H)$ для композита наблюдается два пика, соответствующие двум ферромагнитным фазам – ферриту в стали Ст3 и мартенситу в стали 12Х18Н10Т. Поля пиков $\mu_{\text{диф}}$ для отдельных компонент примерно соответствуют значениям их коэрцитивных сил. Пик от стали Ст3 для отдельной компоненты смещен в сторону более сильных полей а его высота меньше, чем у пика от стали Ст3 в композите. Это можно объяснить большей величиной $\varepsilon_{\text{пр}}$ для образца из стали Ст3 (0,63), нежели в слое Ст3 в пакете (0,53). Таким образом, высота и положение пиков на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости композита могут служить параметрами при оценке степени деформации прокаткой как материала в целом, так и его компонент.

С увеличением $\varepsilon_{\text{пр}}$ прочностные характеристики композита и его отдельных компонент возрастают, а пластичность уменьшается. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$ композита находятся в интервале между значениями $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{\text{в}}$ его отдельных компонент. При проведении механических испытаний исследовали влияние упругопластического деформирования на магнитные характеристики ($H_{\text{с}}$, $\mu_{\text{макс}}$, остаточную индукцию B_r и M_s) композита и его компонент. Значимые изменения M_s , свидетельствующие об образовании мартенсита деформации в стали 12Х18Н10Т, происходят при напряжениях, превышающих $\sigma_{0,2}$. Для стали Ст3 и композита зависимости $H_{\text{с}}$, B_r и $\mu_{\text{макс}}$ от приложенных напряжений σ неоднозначны: при $\sigma < 0,4\sigma_{0,2}$ значения $H_{\text{с}}$ снижаются, $\mu_{\text{макс}}$ и B_r возрастают, а при дальнейшем увеличении σ ход кри-

вых меняется на противоположный. Такое поведение магнитных характеристик при упругом растяжении обусловлено формированием магнитной текстуры напряжений [2]. В области пластической деформации рост H_c и снижение B_r и μ_{\max} объясняются увеличением плотности дислокаций, что приводит к затруднению процессов намагничивания и перемагничивания. В случае стали 12X18H10T деформационное поведение магнитных характеристик более сложное, поскольку на него влияет также разное содержание мартенсита и размеры его частиц в образцах после прокатки. В практически важной упругой области при напряжениях до $\approx 0,4\sigma_{0,2}$ такие магнитные характеристики как H_c , B_r и μ_{\max} ведут себя однозначно и могут быть использованы для оценки растягивающих напряжений в изделиях из исследованных материалов в процессе эксплуатации.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 09-08-01091-а), проекта президиума РАН 09-П-1-1008 и программы ОЭММПУ 09-Т-1-1002 и проекта молодых ученых и аспирантов УрО РАН 2011 г. «Влияние упругопластической деформации на структуру и механические и магнитные свойства двухслойного композита из нержавеющей стали 12X18H10T и стали Ст3, полученного сваркой взрывом».

Литература

1. Апаев Б.А. Фазовый магнитный анализ сплавов. М., «Металлургия», 1972, 280 с.
2. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. М.-Л.: ОГИЗ, 1948, 816 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Субачев Ю.В.¹, Горкунов Э.С.¹, Задворкин С.М.¹, Ульянов А.И.²

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, Россия

Для оценки пористости и содержания углерода в порошковых углеродистых сталях наиболее перспективными среди неразрушающих методов контроля являются магнитные методы [Л], в связи с этим актуальным представляется и разработка магнитных методов оценки механических характеристик изделий из порошковых сталей.

В докладе приводятся результаты изучения корреляционных связей магнитных характеристик порошковых материалов на основе железа с их

твердостью и величиной временного сопротивления. Исследования проводили на следующих материалах: спеченное железо, полученное из порошков узких фракций (40...56, 56...63, 63...80, 80...100, 100...125, 125...160, 160...200 мкм) и пористостью $\Pi = 3$ и 8 %; углеродистые порошковые стали с содержанием углерода 0,03; 0,45; 0,95 % и $\Pi = 8, 12, 18$ %; конструкционная порошковая сталь 50Н2М с $\Pi = 5$ %. Образцы из углеродистых сталей и стали Ст3, взятой в качестве материала с нулевой пористостью, подвергали деформации прокаткой при комнатной температуре при варьировании величины деформации $\varepsilon_{пр} = \frac{a_1 - a_2}{a_1} \cdot 100\%$ (a_1 и a_2 – толщина

образца до и после прокатки соответственно) от 0 до 30 %. Образцы стали 50Н2М подвергали закалке в масло с температур в диапазоне 700...910 °С. Закаленные от 820 °С образцы отпускали при температурах 150...650 °С.

Из начальных кривых намагничивания и петель гистерезиса определяли коэрцитивную силу H_c , максимальную магнитную проницаемость μ_{\max} , остаточную индукцию B_r , намагниченность в максимальном приложенном поле (60 кА/м) M_{\max} . Магнитные измерения проводили по схеме пермеметра. Определяли также твердость по Бринеллю HB по ГОСТ 25698–83, микротвердость по Виккерсу HV по ГОСТ 9450–76, временное сопротивление разрыву σ_b по ГОСТ 18227–98.

Влияние пористости на прочностные свойства изучали на образцах спеченного порошкового железа, полученных однократным и двукратным прессованием. С увеличением размера частиц порошка повышается средний размер пор. Повышение размера пор приводит к снижению HB и H_c (рис. 1). Варьирование размера частиц порошка в диапазоне от 40 до 200 мкм

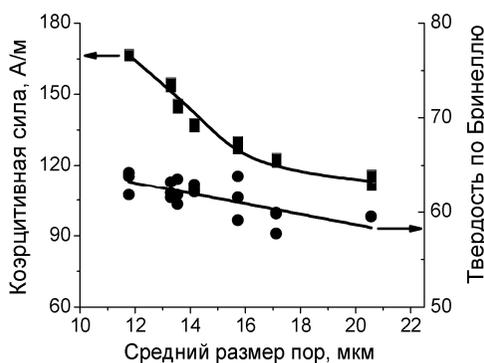


Рис. 1. Влияние среднего размера пор в спеченном железе на его твердость и коэрцитивную силу. Однократное прессование, $\Pi \approx 8,5$ %

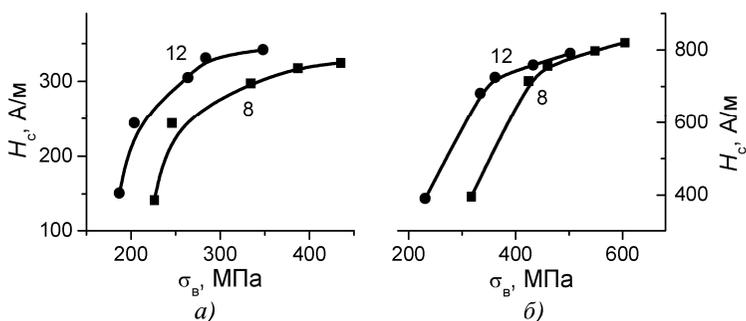


Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы углеродистых порошковых сталей от величины их временного сопротивления после упрочнения прокаткой. Цифрами указана исходная пористость материала (в %): а – 0,03 мас. %; б – 0,45 мас. %

не сказывается на среднем размере зерна спеченного железа, который для однократно прессованных образцов составляет 40 мкм, а для двукратно прессованных – 150 мкм. Двукратное прессование с промежуточным отжигом приводит к сокращению l образцов примерно в 3 раза, повышает твердость материала почти на 10 % и временное сопротивление на 20 %. Доуплотнение материала помимо повышения HV и σ_B приводит также к увеличению M_{\max} на 10 %. Однозначные корреляционные связи между HV , σ_B и M_{\max} позволяют по величине последней оценивать твердость и временное сопротивление порошковых материалов.

Прокатка порошковых сталей сопровождается уменьшением l материала: при $\epsilon_{\text{пр}} = 30$ % пористость снижается примерно в 2 раза, а M_{\max} повышается на 15 % по сравнению с исходным значением. С увеличением $\epsilon_{\text{пр}}$ коэрцитивная сила образцов возрастает монотонно, что, вероятно, связано с ростом плотности дислокаций. Вариации пористости образцов в исходном состоянии не сказываются на характере зависимостей $H_c(\epsilon_{\text{пр}})$. Монотонное изменение M_{\max} и H_c позволяет использовать их как параметры для оценки $\epsilon_{\text{пр}}$ при холодной прокатке изделий из углеродистых порошковых сталей. Однозначный характер зависимостей $H_c(\sigma_B)$ (рис. 2) и $H_c(HV)$ углеродистых порошковых сталей после прокатки указывает на возможность использования коэрцитивной силы при оценке прочностных характеристик упрочненных прокаткой изделий из этих материалов.

При термообработке образцов из стали 50H2M установлено, что H_c и HV с ростом температуры под закалку ($T_{\text{зак}}$) изменяются аналогично (рис. 3а). Изменение $T_{\text{зак}}$ в диапазоне 760...910 °С слабо сказывается на физико-механических свойствах стали. В отличие от этого при «закалке» ниже температур аустенизации (≈ 760 °С) наблюдается значительное снижение HV и H_c (рис. 3а), и в этом случае H_c может использоваться для контроля твердости термообработанных сталей.

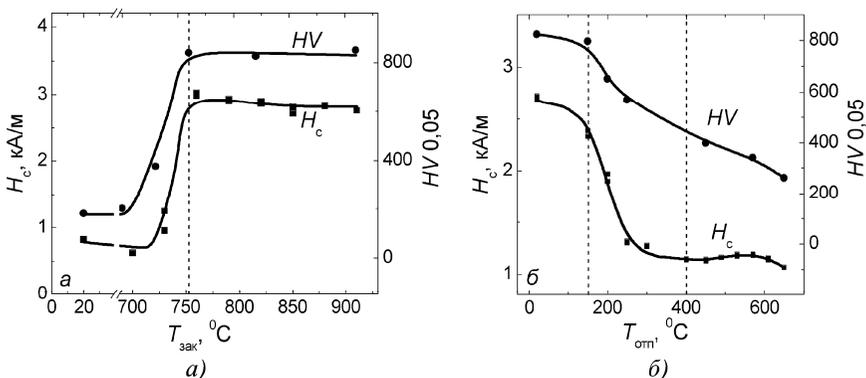


Рис. 3. Коэрцитивная сила и твердость порошковой стали 50H2M после охлаждения с различных температур (а) и отпуска (б)

При повышении температуры отпуска ($T_{\text{отп}}$) закаленной от 820 °С стали 50H2M происходит монотонное снижение ее твердости (рис. 3, б) за счет аннигиляции дислокаций, роста размеров субзерен и выделения углерода из твердого раствора, которое приводит к снижению тетрагональности решетки мартенсита. По этим же причинам в интервале температур отпуска вплоть до 400 °С H_c снижается, а $\mu_{\text{макс}}$ и B_r увеличиваются. В интервале $T_{\text{отп}}$ от 150 до 400 °С между HV и указанными структурно-чувствительными магнитными характеристиками наблюдаются однозначные корреляции, причем H_c более чувствительна к изменениям температуры отпуска, чем твердость (рис. 3, б).

Литература

1. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука. 1993. 252 с.

ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА В МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИХ СТАЛЯХ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Сташков А.Н., Сомова В.М., Сажина Е.Ю.,
Сташкова Л.А., Ничипурук А.П.

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Мартенситно-стареющие стали широко используются в судостроении, авиационной промышленности, ракетостроении. Преимуществом этих сталей является высокая прочность при достаточной пластичности и высокой коррозионной стойкости, хорошая свариваемость и способность к горячей и холодной пластической деформации. К недостаткам этих сталей относит-

ся тот факт, что колебания химического состава в пределах марки стали, например, по C и Ti , могут существенно изменять механические свойства в состаренном состоянии. Кроме того, механические свойства в значительной степени определяются количеством остаточного аустенита, его устойчивостью и легированностью. Поэтому для изделий из указанных сталей, в зависимости от их назначения, разрабатывается такой технологический процесс, в результате которого в их микроструктуре количество остаточного аустенита регламентируется в достаточно узком интервале и тем самым достигается оптимальное сочетание механических свойств. Следовательно, возникает необходимость в разработке неразрушающих методов оценки количества остаточного аустенита, присутствующего в микроструктуре готовых изделий.

До настоящего времени для определения количества остаточного аустенита использовался такой магнитный параметр как намагниченность насыщения. Для ее определения на практике применялся дифференциальный метод. Однако при использовании этого метода для оценки количества остаточного аустенита в образцах, изготовленных из стали 08X15H5Д2Т (ВНС-2УШ) столкнулись со значительным разбросом полученных значений намагниченности. Как известно, намагниченность насыщения M_s является характеристикой, чувствительной к фазовому и химическому составу стали. Поэтому полученный разброс значений намагниченности можно объяснить двумя факторами. Во-первых, в сталях этого класса в зависимости от вида термообработки, времени выдержки при заданных температурах, скорости нагрева и охлаждения мартенсит и остаточный аустенит будут различаться по степени легированности. Например, содержание никеля в остаточном аустените может значительно превышать его значение в химическом составе стали. Во-вторых, выделение частиц второй фазы (интерметаллиды и др.) сопровождается обеднением мартенсита атомами железа и никеля, что должно приводить к снижению намагниченности. Повысить достоверность контроля в этом случае можно за счет подбора соответствующего эталона, что также является довольно не простой задачей.

В качестве параметра контроля нами предложено использовать внутренний коэффициент размагничивания N_i , обусловленный полями размагничивания, возникающими вокруг выделений парамагнитного остаточного аустенита. Размер частиц второй выделяющейся фазы, например типа Ni_3Ti , настолько малы, что они не оказывают заметного влияния на процессы намагничивания и перемагничивания стали. Влияние же этих частиц на безгистерезисную кривую намагничивания можно считать нулевым, следовательно, и внутренний размагничивающий фактор не будет чувствителен к ним. Внутренний коэффициент размагничивания N_i определяется как тангенс угла наклона начального участка безгистерезисной кривой намагничивания (индукции) образца к оси ординат $N_i = H / B$. Согласно ра-

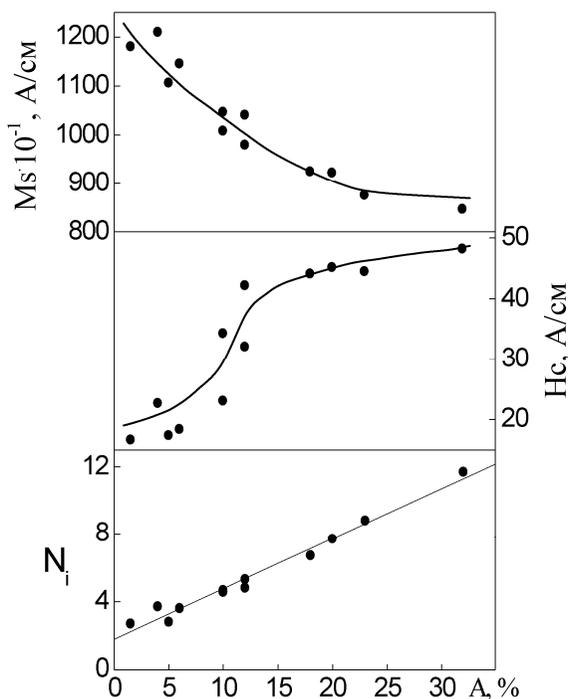


Рис. 1

боте [1], идеальная кривая намагничивания весьма близка к линии, проходящей через средние точки горизонтальных хорд предельной петли гистерезиса.

Химический состав исследованной стали: 0,07 % *C*; 0,45 % *Si*; 0,58 % *Mn*; 0,007 % *S*; 0,017 % *P*; 14,05% *Cr*; 5,33% *Ni*; 0,03% *Ti*; 2,00 % *Cu*. Измерения проводились на ударных образцах 9×9×55 мм. Исходные образцы 10×10×55 мм были изготовлены из металла, подвергнутого горячей деформации при температурах от 920...1100 °С. Чтобы получить образцы с различным количеством остаточного аустенита, их подвергали дальнейшей термообработке: отжигу, закалке и старению. При этом варьировалась как температура термообработки, так и время выдержки, а при отжиге и скорость нагрева. Количество остаточного аустенита определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6.

Магнитные характеристики – коэрцитивную силу H_c и намагниченность насыщения M_s определяли на баллистической установке. Внутренний коэффициент размагничивания N_i определяли на программно-

аппаратном комплексе СИМТЕСТ, разработанном в Институте физике металлов УрО РАН [2], предварительно измерив предельные петли гистерезиса.

Результаты исследований представлены на рисунке. Зависимости H_c и M_s от процента содержания остаточного аустенита $A\%$, в отличие от зависимости $N_i(A\%)$ имеют нелинейный характер. При этом достоверность контроля количества остаточного аустенита по измерениям M_s значительно различается для конкретных участков изменения количества остаточного аустенита. Разброс значений намагниченности насыщения связан с колебаниями степени легированности ферромагнитной матрицы. Внутренний коэффициент размагничивания линейно изменяется во всем изученном диапазоне значений количества остаточного аустенита, при этом коэффициент корреляции между указанными величинами составляет $R = 0,989$.

Преимущество этого метода состоит в том, что достоверность определения количества остаточного аустенита в интервале 0–35 % практически одинакова. Во-вторых, не нужно подбирать специальный эталон, что необходимо делать в случае использования дифференциального магнитного прибора, измеряющего разность значений намагниченностей с учетом появления в структуре образцов различных выделений. В настоящее время ведется разработка автоматизации процесса измерения внутреннего коэффициента размагничивания на приборе СИМТЕСТ.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (номер МК-2716.2010.8) и программы Президиума РАН (проект 09-П-2-1001).

Литература

1. **Бозорт Р.** Ферромагнетизм. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. С. 15.
2. **Костин В.Н., Осинцев А.Н., Шашков А.Н., Ничипурук А.П., Костин К.В., Сажина Е.Ю.** Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии. Дефектоскопия, 2008. № 4. С. 66 – 77.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЕЙ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И ОЦЕНКА ЕЕ ВЕЛИЧИНЫ ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ

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

Доклад посвящен определению условий, при которых результаты измерения магнитной проницаемости μ и коэрцитивной силы H_c образцов в

открытой магнитной цепи могут быть использованы для определения максимальной магнитной проницаемости μ_m их материалов.

По стандартным методикам μ_m измеряют в замкнутой магнитной цепи. Изготовить образцы для таких исследований не всегда возможно. В ряде исследований для определения зависимости μ_m сталей от технологических факторов используются результаты измерения максимального значения μ_t образцов с малым размагничивающим фактором (центральным коэффициентом размагничивания N) в разомкнутой магнитной цепи.

Для определения условий, при которых такой подход является правомерным, воспользуемся [1] формулой для магнитной проницаемости μ ферромагнитного тела:

$$\mu_t = \mu/[1 + N(\mu - 1)]. \quad (1)$$

Для расчета магнитной проницаемости μ материала по μ_t запишем (1) в виде:

$$\mu = k\mu_t,$$

где

$$k = (1 - N)/(1 - N\mu_t). \quad (2)$$

Коэффициент k показывает, во сколько раз магнитная проницаемость μ материала больше магнитной проницаемости μ_t тела. По мере увеличения μ_t и N коэффициент k и крутизна зависимостей $\mu = \mu(\mu_t)$ резко возрастают. Тем не менее, при «точном» измерении μ_t и N магнитная проницаемость μ материала может быть точно рассчитана по (2). Но современная магнитоизмерительная аппаратура не обеспечивает «точного» измерения магнитных параметров материалов при измерении в разомкнутой (и замкнутой) магнитной цепи.

Для анализа погрешности σ расчета по (2) μ материала при использовании результатов измерения μ_t с погрешностью δ_{μ_t} воспользуемся [1] чувствительностью S_x^μ величины μ к параметру x (в качестве которого могут быть μ_t или N), определяемую по формуле:

$$S_x^\mu = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (\Delta\mu \cdot x)/(\Delta x \cdot \mu) = (x \cdot \mu'_x)/\mu, \quad (3)$$

где $\Delta\mu$ – изменение магнитной проницаемости ферромагнитного материала, соответствующее изменению Δx параметра x при постоянстве остальных параметров; μ'_x – производная величины μ по параметру x . Из (3) с учетом (1) и (2) получим:

$$S_{\mu_t}^\mu = 1/(1 - N\mu_t),$$

$$S_N^\mu = [N(\mu_t - 1)]/[(1 - N)(1 - N\mu_t)]. \quad (4)$$

погрешность σ определения μ может быть рассчитана по формуле:

$$\sigma = S_{\mu_r}^{\mu} \delta_{\mu} + S_N^{\mu} \delta_N, \quad (5)$$

где $\delta_{\mu} \approx 6\%$ и $\delta_N \approx 3\%$ – погрешности измерения μ образцов и размагничивающего фактора N .

Проведенным анализом установлено [1], что μ_m сталей при ее значениях $\mu_m \leq 1000$ может быть рассчитана по формуле (2) по результату измерения μ_r в разомкнутой магнитной цепи на образцах с размагничивающим фактором $N \leq 0,001$. При этом должна быть обеспечена относительная погрешность измерения магнитных параметров не хуже $\pm 3\%$. Относительная погрешность расчета может быть определена по формуле (5) с учетом (4). Результаты измерения параметра μ_m на образцах с большим значением N не могут быть использованы для определения μ_m материала из-за чрезмерно большой погрешности расчета.

В [2] дано аналитическое описание реально существующей связи μ_m сталей с их H_C . Для ее установления воспользовались результатами измерения μ_m и H_C электротехнических (Э, ЭА, Э11, Э21, Э31, Э41, ЭАА, Э45, Э46, Э47) и углеродистых сталей, технического железа, сталей 30, 45, 15ХНМФ, 25Х1МФ, 30ХМА, 38ХГН, 38ХС, 50ХНМ, 50ХН1М и 95Х18 после различных режимов закалки и отпуска. По диапазону изменения магнитных свойств ($19 \leq \mu_m \leq 10000$ и $20 \text{ А/м} \leq H_C \leq 7,43 \text{ кА/м}$) проанализированные материалы охватывают практически весь диапазон изменения магнитных свойств сталей.

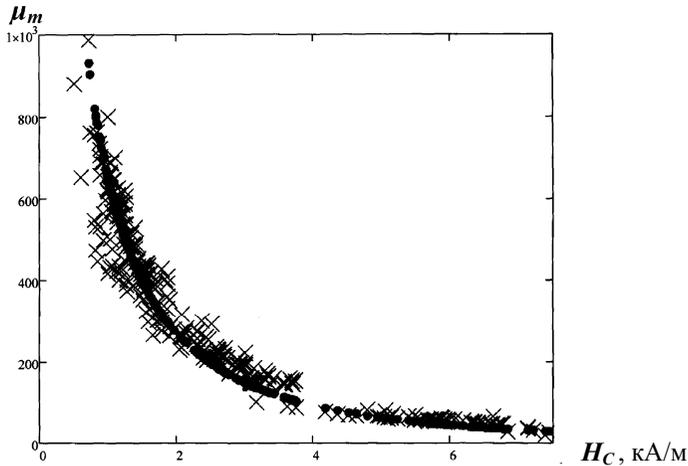


Рис. Зависимость μ_m сталей от их H_C :

x – экспериментальные данные; • – результаты расчета μ_m по (6) при тех же значениях H_C

Анализ зависимости $\mu_m(H_C)$ показал, что в исследованном диапазоне изменения магнитных свойств сталей ее можно аппроксимировать функцией (размерность H_C – кА/м):

$$\mu_m \approx 1 + 35000 \cdot (e^{-4H_C^{0,285}}). \quad (6)$$

Численные коэффициенты в (6) подобраны путем минимизации средней квадратической ошибки S результатов расчета во всем диапазоне изменения H_C и обеспечения при расчете достоверного значения $\mu_m \approx 5000$ при $H_C = 80$ А/м для технически чистого железа.

Сопоставление результатов расчета по (6) с экспериментом свидетельствует [2] о весьма точном описании реально существующей корреляционной связи между μ_m и H_C уравнением (6). Коэффициент R корреляции в линейном уравнении регрессии $\mu_m = \mu_{mp}$ при статистической обработке полученных результатов составил около 0,976 а S составила 86,6. Расхождение между результатами расчета по (6) и экспериментом в большинстве случаев не превышает суммы возможных погрешностей измерения параметров μ_m и H_C ($\pm 9\%$) и редко выходит за пределы $\pm 20\%$. Достоверность оценки μ_m стали по ее H_C по формуле (6), учитывая широкий диапазон изменения оцениваемого и расчетного параметров (H_C изменялось в 370 раз, а μ_m – в 500 раз) следует признать высокой. Полученный результат позволяет рекомендовать формулу (6) для оценки μ_m сталей по результатам измерения их H_C .

Для оценки μ_m материала изделий по (6) нет необходимости проводить эксперименты на образцах в замкнутой магнитной цепи. Информация о μ_m может быть получена по справочным данным об H_C , результатам измерения H_C изделий в открытой магнитной цепи или с использованием приставного электромагнита. В качестве примера практического использования на основании формулы (6) и результатов измерения H_C образцов в открытой магнитной цепи установлена [2] действительная зависимость μ_m стали 08Ю от температуры $T_{отж}$ отжига. Показано, что, в отличие от справочных данных, при изменении $T_{отж}$ от 20 до 900 °С μ_m стали 08Ю изменяется не в 1,7, а в 4 раза.

Литература

1. **Сандомирский С.Г.** Анализ погрешности измерения магнитной проницаемости ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи // Измерительная техника. 2010. № 9. С. 57 – 61.

2. **Сандомирский С.Г.** Оценка максимальной магнитной проницаемости сталей по коэрцитивной силе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. № 3. С. 35 – 38.

РАСЧЕТ РЕЛАКСАЦИОННОЙ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА И ТЕЛА

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

Доклад посвящен расчету релаксационной коэрцитивной силы H_r сталей и изделий из них по коэрцитивной силе H_C , намагниченности насыщения M_S , остаточной намагниченности M_r и размагничивающему фактору N .

H_r – величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для приведения магнитного материала с остаточной намагниченностью в статически размагниченное состояние (рис. 1). Большое значение знание H_r имеет при необходимости размагничивания ферромагнитных материалов и изделий из них в электротехнике или после магнитного контроля. Применение постоянных размагничивающих полей с напряженностью, отличной от H_r , приводит к недостаточной эффективности размагничивающих устройств и не допустимому уровню остаточной намагниченности изделия, например, трубопровода.

Для расчета воспользуемся (рис. 1) подобием треугольников, катетами которых являются H_r , M_{Hr} и H_C , M'_r , из которого следует:

$$M_{Hr} = M'_r \frac{H_r}{H_C}. \quad (1)$$

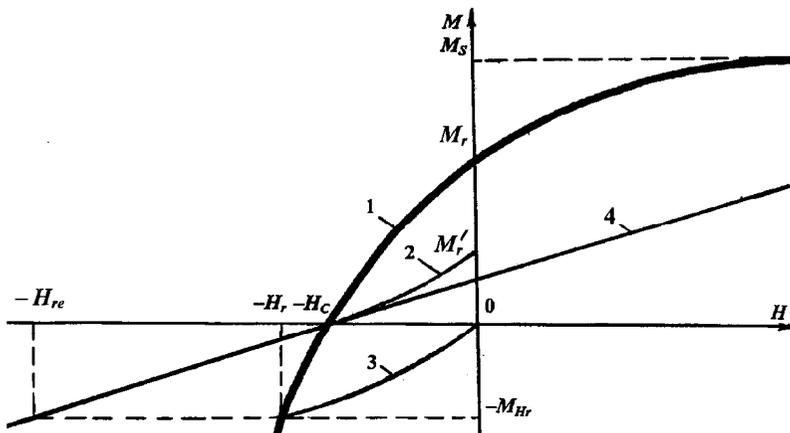


Рис. 1. Нисходящие ветви предельной петли гистерезиса ферромагнитного материала (1) и тела (4) и кривые возврата, при перемagnetивании материала полями $-H_C$ (2) и $-H_r$ (3)

где M_r' – остаточная намагниченность материала после намагничивания до насыщения, перемагничивания полем $-H_C$ и выключения этого поля.

Проведенный расчет [1] позволил получить следующее аналитическое выражение для H_r :

$$H_r = H_C \left[1 + \frac{F}{2 \operatorname{tg}(\pi K_{II}/2)} \right]. \quad (2)$$

где

$$F = \operatorname{arctg}(2 \operatorname{tg} \pi K_{II}/2) - \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \pi K_{II}/2),$$

$$K_{II} = M_r/M_S. \quad (3)$$

В диапазоне изменения $0,2 \leq K_{II} \leq 1$ зависимость (2) практически точно может быть интерполирована функцией

$$H_r \approx H_C [1 + 0,64(1 - K_{II})^2]. \quad (4)$$

Для расчета релаксационной намагниченности M_{Hr} ферромагнитного материала получено:

$$M_{Hr} = M_r \frac{F}{\pi K_{II}} \left[1 + \frac{F}{2 \operatorname{tg}(\pi K_{II}/2)} \right]. \quad (5)$$

В практически важном диапазоне изменения $0,4 \leq K_{II} \leq 1$ формула (5) может быть с достаточной для практики точностью интерполирована зависимостью

$$M_{Hr} \approx \frac{4}{3} M_r (1 - K_{II})^2. \quad (6)$$

Показано [1], что разработанные формулы (4) и (6) с достаточной для практики точностью описывают все достоверно известные экспериментальные результаты.

Для расчета релаксационной коэрцитивной силы H_{re} ферромагнитного тела получено [2]:

$$H_{re} \approx H_C [1 + 0,64(1 - K_{II})^2] + \frac{4}{3} K_{II} (1 - K_{II})^2 N M_S. \quad (7)$$

Результаты сопоставления экспериментальной по [3] и расчетной по (7) зависимостей H_{re} цилиндров из стали 40X от температуры $T_{отп}$ отпуска (рис. 2) показывают, расчет H_{re} по (7) не только с достаточной для практики точностью количественно соответствуют экспериментальным значениям H_{re} , но и верно качественно отражает различный ход зависимостей $H_{re} = H_{re}(T_{отп})$ и $H_C = H_C(T_{отп})$ для изделий из стали 40X.

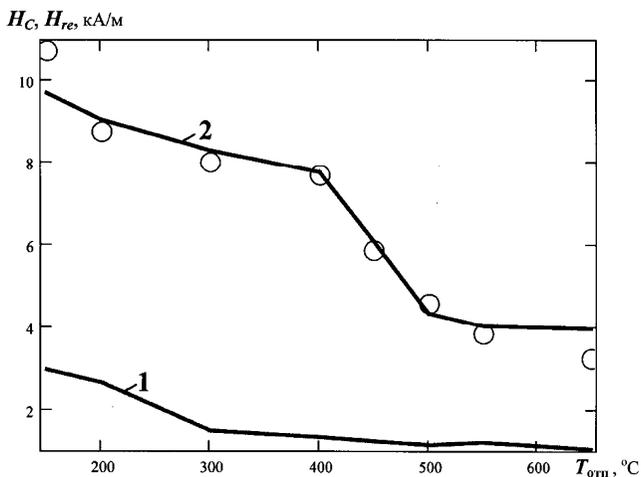


Рис. 2. Влияние температуры $T_{\text{отп}}$ отпуска цилиндров длиной 35 мм, диаметром 7 мм из стали 40X на их H_C (1) и H_{re} :
2 – расчет по (7); О – экспериментальные результаты по [3]

По разработанной формуле (7) релаксационная коэрцитивная сила H_{re} ферромагнитного тела может быть рассчитана только по размагничивающему фактору N , коэрцитивной силе H_C и коэффициенту прямоугловности $K_{\Pi} = M_r/M_S$ предельной петли гистерезиса его материала. Необходимые для расчета магнитные параметры приведены в справочной литературе практически для всех известных сталей и могут быть измерены с высокой точностью по стандартным методикам. Центральные коэффициенты размагничивания N тел различной формы могут быть рассчитаны по их геометрическим размерам по формулам [4].

Литература

1. Сандомирский С.Г. Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Электричество. 2010. № 7. С. 55 – 58.
2. Сандомирский С.Г. Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного тела // Электротехника. 2011. № 2. С. 58 – 62.
3. Михеев М.Н., Горкунов Э.С., Дунаев Ф.Н. Неразрушающий магнитный контроль закаленных и отпущенных изделий из низколегированных конструкционных и простых углеродистых сталей. I // Дефектоскопия. 1977. № 6. С. 7 – 17.
4. Сандомирский С.Г. Рекомендации по применению в технических расчетах формул для центрального коэффициента размагничивания сплошных и полых цилиндров, стержней и пластин из материала с высокой магнитной проницаемостью (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2008. № 3. С. 38 – 46.

ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЕЙ ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ, ИЗМЕРЕННЫМ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Сандомирский С.Г.

ОИМ НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Доклад посвящен разработке и анализу методов определения и оценки остаточной намагниченности сталей по результату измерения различных магнитных параметров изделий в открытой магнитной цепи.

Остаточная намагниченность M_r сталей наряду с их коэрцитивной силой H_C является магнитным параметром, чувствительным к структуре материала. Но для многих сталей зависимости M_r от технологических факторов в справочной литературе не приведены, а данные о M_r некоторых материалов различаются. Это является следствием измерения не M_r сталей, а остаточной намагниченности M_d образцов в разомкнутой магнитной цепи. Для некоторых сталей вместо M_r приведены результаты релаксационной намагниченности M_{Hr} .

Объективная причина этого – в сложности измерения M_r по стандартным методикам (в замкнутой магнитной цепи). Изготовить образцы для таких исследований не всегда возможно. Отсутствие достоверных данных о M_r многих сталей сдерживает анализ особенностей изменения структуры сталей при термических обработках и процессов их намагничивания при разработке методов неразрушающего магнитного контроля их качества.

В докладе проведен анализ возможности использования результатов измерения параметров образцов в открытой магнитной цепи для расчета остаточной намагниченности материалов. Показано [1], что из-за низкой чувствительности M_d ферромагнитного тела к M_r его материала использование результата измерения M_d образцов на стандартной измерительной аппаратуре для расчета M_r сталей не позволяет получить достоверный результат.

Анализ магнитных свойств термически обработанных сталей показал [2], что под влиянием технологических факторов M_r сталей изменяется в определенных пределах, связанных с их H_C и намагниченностью технического насыщения M_S (рисунок).

По диапазону изменения свойств: $200 \leq M_r \leq 1400$; $500 \leq M_S \leq 1707$ и $0,071 \leq H_C \leq 7,43$ (здесь и далее M_r , M_S и H_C выражены в кА/м) проанализированные материалы охватывают практически весь диапазон изменения магнитных свойств сталей. Это явилось основанием для разработки формулы для оценки остаточной намагниченности M_r сталей как среднего значения возможного диапазона ее изменения.

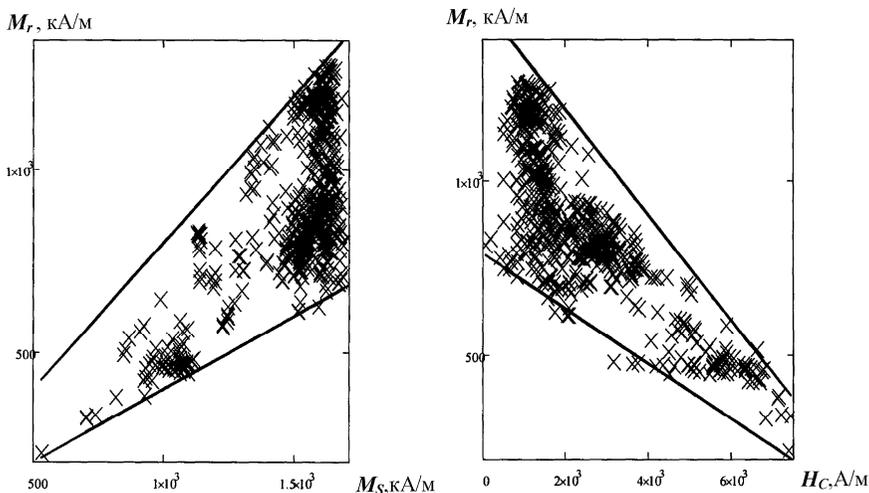


Рис. Зависимости $M_r(M_S)$ и $M_r(H_C)$ 32 сталей после различных режимов закалки и отпуска

Анализ полученных результатов показывает, что практически все значения M_r сталей заключены в следующих диапазонах их изменения:

$$0,4M_S \leq M_r \leq 0,8M_S, \quad (1)$$

$$80(10 - H_C) \leq M_r \leq 150(10 - H_C). \quad (2)$$

Следовательно, достоверные значения M_r сталей, с учетом измерения M_S и H_C , заключены в следующем диапазоне их изменения:

$$\max\{0,4M_S; 80(10 - H_C)\} \leq M_r \leq \min\{0,8M_S; 150(10 - H_C)\}. \quad (3)$$

Среднее значение достоверного диапазона (3) возможного изменения M_r может быть рассчитано по формуле:

$$M_r = 575 + 0,3M_S - 57,5H_C + |0,1M_S + 20H_C - 200| - |0,2M_S + 37,5H_C - 375|, \quad (4)$$

Значение σ максимально возможной относительной погрешности определения значения M_r по (4) может быть рассчитано по формуле:

$$\sigma = \frac{700 + 0,4M_S - 70H_C - |0,8M_S - 150(10 - H_C)| - |0,4M_S - 80(10 - H_C)|}{2300 + 1,2M_S - 230H_C - |0,8M_S - 150(10 - H_C)| + |0,4M_S - 80(10 - H_C)|} . \quad (5)$$

Показано [2], что многих сталей отклонение результатов расчета M_r от справочных значений меньше рассчитанных по (5) значений $\sigma \approx 0,22 \dots 0,29$. С учетом неизбежных погрешностей измерения магнитных параметров, совпадение результатов расчета по (4) с достоверными справочными данными приемлемо для решения многих практически важных задач.

В качестве примера решения одной из них восстановлена действительная зависимость M_r стали 08Ю от температуры отжига. С использованием разработанных формул (4) и (5) установлен достоверный интервал возможного изменения M_r стали 08Ю, отожженной при различных температурах. Показано, что действительные значения M_r стали 08Ю в 1,7 – 14 раз больше справочных, полученных измерением на пластинах размером 200×20×1 мм в разомкнутой магнитной цепи соленоида баллистической установки БУ-3.

Также разработана [1] формула для расчета M_r по результату измерения M_S и M_{Hr} в открытой магнитной цепи:

$$M_r \approx M_S (0,92 - 2,55 M_{Hr} / M_S) . \quad (6)$$

Показано [1], что коэффициент корреляции линейного уравнения регрессии M_r (эксперимент) = M_r (расчет) составляет около 0,94, а расхождение экспериментальной и рассчитанной по (6) величины M_r в большинстве случаев не превышает возможной погрешности измерения магнитных параметров M_S и M_{Hr} .

Использование разработанных формул (4) и (6) позволяет определять остаточную намагниченность M_r материала стальных изделий в разомкнутой магнитной цепи, когда ее измерение по стандартным методикам невозможно.

Литература

1. **Сандомирский С.Г.** Анализ возможности измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи // Метрология. 2010. № 3. с. 33 – 41.
2. **Сандомирский С.Г.** Оценка остаточной намагниченности термообработанных сталей по намагниченности технического насыщения и коэрцитивной силе // Сталь. 2010. № 12. С. 61 – 63.

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ АУСТЕНИТНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Ригмант М.Б., Ничипурук А.П., Корх М.К., Огнева М.С.,
Степанова Н.Н., Казанцева Н.В., Давыдов Д.И.
Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Доклад посвящен изучению фазовой и структурной стабильности сплава ЧС-70В в ходе эксплуатации, установлению причин появления деформационно-индуцированного магнетизма в жаропрочном сплаве с упрочняющей фазой на основе интерметаллида Ni_3Al , а также оценке возможности применения к изделиям из него методов магнитного неразрушающего контроля.

В настоящее время на различных ГРЭС активно предпринимаются попытки повышения мощности и к.п.д. газотурбинных установок. Это достигается повышением рабочих температур и скорости вращения лопаток турбин. В частности экспериментальная турбина ГТЭ-45-3 Якутской ГРЭС имеет мощность в четыре раза больше серийных турбин. Это достигается повышением рабочей температуры с $800\text{ }^\circ\text{C}$ до $880\text{ }^\circ\text{C}$ и увеличением в полтора раза скорости вращения. При работе по такому режиму сплав ЧС-70В (ХН58КВТЮМБЛ) оказывается в экстремальных условиях по температуре и уровню напряжений. Разрушение лопатки газотурбинной установки произошло после 13 месяцев активной эксплуатации.

Авторами проведено комплексное исследование образцов, вырезанных из разных участков литой поликристаллической лопатки турбины. Нейтронографические исследования осуществлялись в отделе работ на атомном реакторе ИМФ УрО РАН на дифрактометре Д-3 ($\lambda = 0,2423\text{ нм}$), установленном на горизонтальном канале реактора ИВВ-2М. Магнитные исследования образцов выполнены с помощью измерителя магнитной проницаемости маломагнитных сплавов и аустенитных сталей ИМПАС-1. Чувствительность метода по локальному измерению магнитной восприимчивости составляет $(\pm 1 \cdot 10^{-4})$. Исследования тонкой структуры проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-200СХ в Центре электронной микроскопии УрО РАН.

В данном случае ни методами структурной нейтронографии, ни при электронно-микроскопических исследованиях не наблюдалось появления каких-либо новых фаз, в том числе выделений чистого никеля, кобальта и т.д. Однако, электронно-микроскопические исследования материала турбинной лопатки позволяют говорить о том, что после эксплуатации по экспериментальному режиму деформированным оказывается не только твердый раствор, но и упрочняющая γ' -фаза. Именно в этом случае у сплава

появляются ферромагнитные свойства, которые и были зарегистрированы прибором ИМПАС. Появление дефектов внутри γ' -фазы и связанных с этим изменением магнитных свойств (магнитная восприимчивость повышается на 2–3 порядка) позволяет применить методы магнитного неразрушающего контроля к оценке работоспособности турбинных лопаток, а своевременная замена выработавших свой ресурс деталей позволит избежать их аварийного разрушения.

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ И ГЕОМЕТРИИ СВАРНОГО ШВА ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Туева Е.А.,
Горулева Л.С., Задворкин С.М.
ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Доклад посвящен проблеме создания неразрушающих методов контроля и диагностики состояния сварных соединений.

Чаще всего в процессе эксплуатации очагами разрушения металлоконструкций, в том числе магистральных трубопроводов, являются сварные соединения. Нарушение прочности сварных соединений трубопроводов происходит, во-первых, из-за дефектов, которые могут возникнуть в процессе сварки вследствие различных отклонений от установленных норм и технических требований, а, во-вторых, из-за действия значительных напряжений, являющихся результатом взаимодействия металла трубы со средой во время эксплуатации. В первом случае, в частности, возможны дефекты формирования швов, происхождение которых связано с нарушением режима сварки, недостаточной квалификацией сварщика и другими нарушениями технологического процесса, что в конечном итоге может привести к несоответствию сварных швов своим расчетным размерам (неполномерность, неравномерная ширина и т.п.). В связи с этим особую актуальность приобретает задача разработки неразрушающих магнитных методов контроля состояния сварных соединений по магнитным измерениям. Решение вышеупомянутой задачи включает в себя, в частности, поиск магнитных параметров, которые бы позволили осуществлять учет изменения физико-механических свойств отдельных зон сварных соединений и производить оценку их геометрических размеров.

В работе изучено поведение магнитных характеристик, измеренных на образцах, содержащих сварной шов, как в замкнутой магнитной цепи, так и в полузамкнутой магнитной цепи с помощью приставных преобразователей, для случаев различной ширины сварного шва и вариантах различного соотношения перемагничиваемых объемов материала сварного шва и материала околшовной зоны. Исследования проведены на образцах, вырезанных из прямошовной трубы $\varnothing 1420 \times 21,6$ мм, изготовленной из листовой

стали класса прочности Х70, прокатанной по технологии контролируемой прокатки и содержащей в себе клинообразный сварной шов. Образцы были вырезаны на разных расстояниях от поверхности основного металла, при этом на каждой стороне полученных пластин были зафиксированы части клинообразного сварного шва, что позволило получить образцы с различной шириной сварного шва.

Установлено, что по значениям напряженности магнитного поля, в которых локализуются максимумы полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости, можно контролировать изменения структурного состояния и механических характеристик отдельных зон сварного соединения (металла околошовной зоны и металла сварного шва), а по величине максимумов – судить о вкладе каждой из зон в сигнал первичного преобразователя измерительного прибора.

Показано, что распределение значений тока размагничивания приставного электромагнита, I_{pc} , соответствующего нулевому магнитному потоку, и магнитных шумов Баркгаузена (среднеквадратичных значений напряжения и числа скачков Баркгаузена за 10 циклов перемагничивания) по ширине образца зависит от ширины сварного шва. По величине данных магнитных характеристик возможно определять отдельно свойства металла сварного шва и металла околошовной зоны.

Показано, что ширина и амплитуда максимумов зависимостей тангенциальной составляющей вектора магнитной индукции, полученных в результате сканирования по ширине образца, также коррелирует с шириной сварного шва: при больших размерах сварного шва пик более узкий и имеет большую амплитуду. Зависимости данной магнитной характеристики имеют характерные перегибы, локализующиеся вблизи границ сварного шва, что дает возможность по полученным зависимостям оценить ширину сварного шва.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 09-08-01091-а и проекта, выполняемого совместно с ИТПМ СО РАН № 09-С-1-1011.

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Лухвич А.А.¹, Шукевич А.К.¹, Лукьянов А.Л.¹,
Полоневич А.А.¹, Калошин В.А.²

¹*ИИФ НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*
²*ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко»,*

Химки, Россия

При изготовлении изделий космической техники используют металлокерамические покрытия. Покрытия представляют собой мелкодисперсную систему, в состав которой входят частицы никеля и керамика. Такие

покрытия наносятся на детали различной геометрии, что вызывает затруднения при контроле их толщины. По магнитным свойствам покрытие эквивалентно линейному ферромагнетику, проницаемость которого близка к 2. Поэтому при контроле толщины приходится иметь дело с измерениями слабых информативных сигналов, которые по крайней мере на порядок меньше, чем от чистого никеля. Наши исследования (эксперимент и компьютерное моделирование) показали, что задачу контроля толщины таких покрытий можно с успехом решить, используя магнитодинамический метод [1, 2], основанный на измерении магнитного потока, создаваемого намагниченным участком контролируемого объекта. Следует отметить, что данный метод автоматически исключает влияние на информативный сигнал как электрических свойств покрытия и основания, так и первичного намагничивающего поля. Толщинометры МТЦ, основанные на этом методе, градуируются по плоским эталонам, поэтому любую другую геометрию изделия следует рассматривать как мешающий фактор.

Поверхность около любой точки однозначно характеризуется двумя главными радиусами кривизны. Очевидно, что чем меньше радиусы кривизны, тем большее влияние геометрии на информативный сигнал любого преобразователя. Так как толщинометры градуируются по плоским эталонам, рассматриваемое изменение информативного сигнала следует отнести к систематической погрешности измерения. Ясно, что максимальное значение эта погрешность будет иметь при минимальном значении главных радиусов кривизны, что соответствует сфере. В данном сообщении методом компьютерного моделирования исследовано влияние радиуса сферической поверхности на информативный сигнал магнитодинамического преобразователя и предложены методы корректировки сигнала, которые позволяют если и не исключить это влияние, то существенно его снизить. Рассмотрены случаи неферромагнитного и ферромагнитного оснований выпуклой и вогнутой поверхности радиусом от 33 до 200 мм. Типичные результаты для случая немагнитного основания представлены на рис. 1. Как следует из рисунка, во всех рассмотренных случаях сохраняется линейная зависимость сигнала от толщины покрытия, а выпуклость и вогнутость оказывают разное по знаку влияние на величину сигнала. Расчеты показывают, что максимальное значение систематической погрешности в рассмотренных случаях достигает 70 % для радиуса $R = -33$ мм (вогнутость). Используя линейный характер зависимости сигнала от толщины покрытия, появившуюся погрешность можно практически полностью исключить. Действительно, из линейности следует: $F(h, R) = k(R)F(h)$, где $k(R)$ – коэффициент, зависящий от радиуса. Расчеты показывают, что эту зависимость можно выразить аналитически:

$$k(R) = 0,9932 - 15,586R^{-1} - 12,896 R^{-2} - 9673,8 R^{-3} \text{ – для вогнутой,}$$

$$k(R) = -0,9861 - 11,4526 R^{-1} - 93,0033 R^{-2} - 103,5499 R^{-3} \text{ – для выпуклой поверхности.}$$

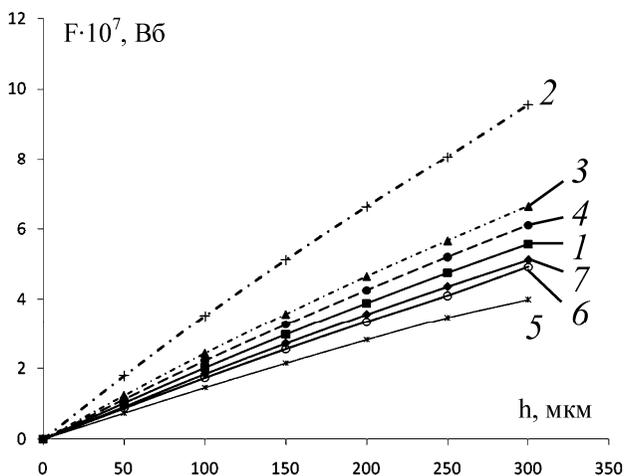


Рис. 1. Влияние толщины h металлокерамических покрытий ($\mu = 2,079$) на ферромагнитных основаниях на информативный сигнал F : кривая 1 – плоская поверхность, 2–4 – вогнутая, 5–7 – выпуклая; кривые 2, 5 – $R = 33$ мм; 3, 6 – $R = 80$ мм; 4, 7 – $R = 150$ мм

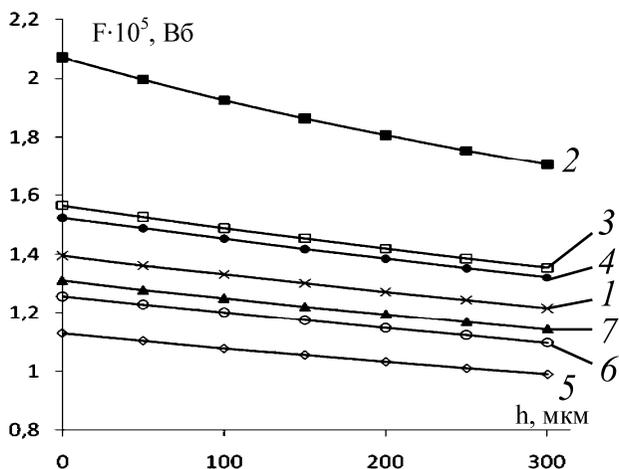


Рис. 2. Влияние толщины h металлокерамических покрытий ($\mu = 2,079$) на ферромагнитной стали 06X15H6MVFB на информативный сигнал F : кривая 1 – плоская поверхность, 2–4 – вогнутая, 5–7 – выпуклая; кривые 2, 5 – $R = 33$ мм; 3, 6 – $R = 80$ мм; 4, 7 – $R = 150$ мм

Применение этих формул позволяет максимально приблизить все зависимости к градуировочной, а погрешность измерения $\alpha = (F - F_p)/F_p$ – к погрешности градуировки (F_p – сигнал от плоской поверхности, F – от сферы). Аналогичные расчеты были проведены для ферромагнитного основания. При этом в качестве основания рассмотрены стали 03X12H10МТР-ВД, 12Х21Н5Т и 06Х15Н6МВФБ, кривые намагничивания которых были получены при данном исследовании и задавались таблично. Следует отметить, что в данном случае источником информативного сигнала служит не только покрытие, но и ферромагнитное основание.

Сказанное хорошо видно по рис. 2 (основание – сталь 06Х15Н6МВФБ). Из рисунка следует, что, как и в случае немагнитного основания, зависимость носит линейный характер, при этом прямые практически параллельны между собой. Такой характер зависимостей сохраняется и для других оснований. Это обусловлено слабыми магнитными свойствами покрытия по сравнению со свойствами оснований. Очевидно, что информативный сигнал при нулевой толщине покрытия однозначно определяется магнитными свойствами и геометрией основания. Что касается систематической погрешности, то и в этом случае она неприемлемо велика (до 46 %), хотя и меньше, чем в случае немагнитного основания. Из параллельности зависимостей следует, что влияние радиуса кривизны на информативный сигнал можно существенно уменьшить «коррекцией нуля», т. е. электронными средствами (добавлением или вычитанием), и информативный сигнал от сферы без покрытия свести к аналогичному от плоской поверхности. В этом случае погрешность измерения толщины покрытия на сферической поверхности будет определяться точностью измерения сигнала и возможной «непараллельностью» зависимостей. Как показывают расчеты, она близка к погрешности градуировки.

Обширные исследования, малая часть которых приведена в данном сообщении, показали, что: 1) магнитодинамический метод и толщиномеры типа МТЦ (при соответствующем выборе их параметров) обеспечивают измерение толщины металлокерамических покрытий как на неферромагнитном, так и на ферромагнитном основании; 2) предложена методика измерения толщины металлокерамических покрытий на изделиях сложной геометрии толщиномером, градуировка которого проведена по плоским эталонам.

При этом если основание неферромагнитное, то для перехода на шкалу градуировки необходимо знать радиус кривизны исследуемой поверхности, а в случае ферромагнитного основания достаточно провести «коррекцию нуля».

Естественно, во всех случаях необходимо иметь сведения о составе покрытия.

Список литературы

1. Лухвич А.А., Лукьянов А.Л., Калошин В.А., Шукевич А.К. Магнитная толщинометрия слабомагнитных мелкодисперсных покрытий // Дефектоскопия, 2008, № 8. С. 35 – 42.
2. Лухвич А.А., Лукьянов А.Л., Кременькова Н.В., Шукевич А.К. Магнитный метод контроля толщины слабомагнитных двухсторонних покрытий по немагнитному основанию // Дефектоскопия, 2009, № 7. С. 75 – 82.

ВЫБОР МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л., Полоневич А.А.
*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск,
Республика Беларусь*

В представленном нами в материалах конференции докладе «Контроль никелевых покрытий камер сгорания ракетных двигателей» обоснованы преимущества магнитодинамического метода, методика и выбор характеристик преобразователя для контроля никелевых покрытий. Они обеспечивают при энергии постоянного магнита ~130 мДж диапазон измерений до 700 мкм с отстройкой от влияния на результаты контроля структуры покрытий и магнитных свойств корпуса двигателя. При контроле хромовых покрытий задача принципиально усложняется; по существу мы имеем четырехслойную структуру хромовое покрытие – никелевое покрытие – ферромагнитная прослойка – ферромагнитный корпус. Использовать первичные преобразователи, создающие сильные и средние намагничивающие поля, не представляется возможным по двум причинам. Первая состоит в том, что в этом случае информативный сигнал являлся бы функцией толщин хрома, никеля и прослойки. Очевидно, что выделить составляющую сигнала, обусловленную толщиной хромового покрытия, не представляется возможным. Вторая причина состоит в том, что разрешающая способность по толщине хрома в значительной степени зависит от величины первичного намагничивающего поля и толщины никеля; это подтверждается табл. 1. Значения разрешающей способности вычислены по результатам измерений толщины имитаторов хрома (неферромагнитных пластин), накладывавшихся на меры никелевых покрытий.

1. Разрешающая способность по толщине хрома, мкм/ед., в диапазоне до 200 мкм

Толщина никеля, мкм	Энергия постоянного магнита, мДж		
	~15	~55	~130
102	0,64	1,96	4,18
233	0,23	0,72	1,66
355	0,16	0,42	1,09
515	0,15	0,27	0,72
724	0,15	0,23	0,60

Очевидно, что она в несколько раз увеличивается с ростом толщины никеля и в таких же пределах снижается с увеличением энергии магнита (намагничивающего поля). В принципе, разрешающая способность ~1 мкм/ед. является достаточной, и по этой величине преобразователь с энергией магнита ~55 мДж можно было бы использовать для контроля хрома. Однако, как было показано ранее, глубина его информативной зоны составляет порядка 4–6 мм и невозможно избежать влияния корпуса двигателя на результаты контроля. преобразователь с энергией магнита ~15 мДж обеспечивает разрешающую способность в доли микрометра. Но главное преимущество состоит в том, что глубина его информативной зоны менее 1 мм, и при минимальной толщине бронзовой прослойки ~2 мм для всех типов двигателей полностью исключается влияние корпуса на результаты контроля хрома. Остаются две проблемы, а именно зависимость величины информативного сигнала от толщины никеля и его свойств. Кажется возможным выполнить градуировку прибора по хрому при разных значениях толщины никеля и, предварительно зная его толщину, воспользоваться градуировочными зависимостями для контроля хрома. Исследования в этом направлении не дали положительных результатов; из опыта работы можно заключить, что погрешность даже порядка 50 % недостижима. Это обусловлено сильной зависимостью сигнала от толщины никеля и его свойств. Можно предположить, что если бы удалось предварительно выполнить градуировку приборов по ферромагнитным пластинам в зонах и точках контроля до нанесения хрома, то в дальнейшем полученные зависимости можно было бы использовать для контроля его толщины. Функциональные возможности прибора МТДП-1 позволяют реализовать вариант такого подхода. Учитывая необходимость контроля хрома на никеле, толщина которого меняется в пределах 200...700 мкм, за счет выбора конструктивных элементов первичного преобразователя мы ограничили глубину его информативной зоны ~200 мкм; таким образом задача сводится к случаю контроля хрома на массивном никеле. Следовательно, зависимость сигнала от толщины исключается или минимизируется. Результаты показаны на рисунке.

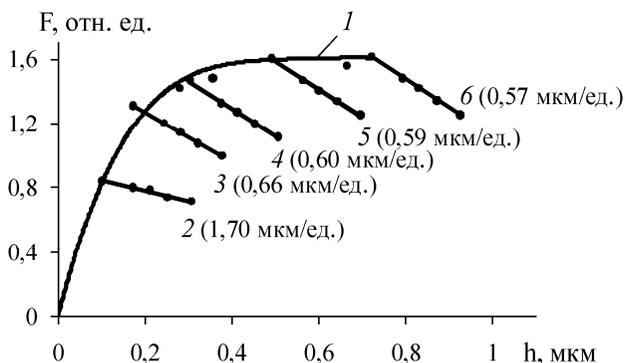


Рис. 1. Зависимость информативного сигнала F модернизированного преобразователя от толщины h никеля и хрома до и после наложения ферромагнитных пластин толщиной 71-204 мкм:

кривая 1 – никель без хрома; 2 – никель толщиной 102 мкм; 3 – 172 мкм; 4 – 303 мкм; 5 – 491 мкм; 6 – 724 мкм; рядом с номерами кривых указана разрешающая способность по толщине хрома

Углы наклона кривых 3-6 практически одинаковы, что подтверждает возможность использования единой градуировочной зависимости во всем востребованном диапазоне контроля хрома. Однако остается существенной составляющая погрешности, обусловленная структурными свойствами никеля. Единственным вариантом остается измерение сигнала в зонах и точках контроля до нанесения хрома, внесение в память прибора и использование в дальнейшем для коррекции градуировочной зависимости, что существенно снижает погрешность контроля; функциональные возможности прибора МТДП-1 это позволяют. Эффективность такой коррекции подтверждается результатами экспериментальных исследований (табл. 2). Видно, что магнитодинамический преобразователь с энергией магнита ~15 мДж обеспечивает контроль толщины хрома на никеле с погрешностью ~5...6 %.

2. Погрешность контроля толщины хрома на никеле на фрагментах камер сгорания

Толщина никеля, мкм	Фрагмент 1		Фрагмент 2		Фрагмент 3		Фрагмент 4	
	~310		~200		~290		~275	
Толщина хрома, мкм	71	150	71	150	71	150	71	150
Погрешность, %	-4,9	-2,1	-4,1	-6,3	-2,0	-3,5	-4,4	-7,4

Толщина никеля, мкм	Фрагмент 5		Фрагмент 6		Фрагмент 7	
	~365	~450	~380			
Толщина хрома, мкм	71	150	71	150	71	150
Погрешность, %	-5,9	-4,3	1,1	-0,6	0,1	-0,3

В предыдущем сообщении мы обосновали выбор характеристик магнитодинамического преобразователя и методику контроля никелевых покрытий прибором МТНП-1. Эти же функциональные возможности сохранены и в приборе МТДП-1; они могут быть реализованы с использованием съемного преобразователя с энергией магнита ~130 мДж. Кроме того, например, при приемке изделий возникает потребность измерить (оценить) толщину никеля под слоем хрома. Такая возможность и достижимая точность следуют из данных, представленных в табл. 3 (получены прибором, градуировка которого выполнена на мерах без хромовых покрытий). Видно, что при толщине хрома ~100 мкм погрешность контроля никеля не превышает 5 %; при 150...200 мкм она составляет 5...10 %.

Функциональные возможности прибора МТДП-1 (комплектуется двумя съемными преобразователями) обеспечивают контроль хромовых покрытий в диапазоне до 200 мкм на никеле независимо от его толщины в пределах 200-700 мкм и структурных свойств с погрешностью ~5 % и контроль (оценку) толщины никеля под слоем хрома с погрешностью ~10 %. При необходимости диапазоны измерений могут быть изменены или разбиты на поддиапазоны, при этом погрешность контроля будет уменьшаться.

3. Погрешность контроля толщины никеля под хромом, %

Толщина никеля, мкм	Толщина хрома (неферромагнитной пластины), мкм			
	71	109	150	204
102	-1,4	-2,6	-4,0	-5,6
303	-2,5	-4,3	-6,4	-8,7
515	-3,0	-4,5	-6,8	-9,5

4. Погрешность контроля толщины никеля под хромом, %

Толщина никеля, мкм	Толщина хрома (неферромагнитной пластины), мкм			
	71	109	150	204
102	-1,4	-2,6	-4,0	-5,6
303	-2,5	-4,3	-6,4	-8,7
515	-3,0	-4,5	-6,8	-9,5

КОНТРОЛЬ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ КАМЕР СГОРАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л., Полоневич А.А.
*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск,
Республика Беларусь*

В существующих типах двигателей между ферромагнитным корпусом и однослойным никелевым (двухслойным хромоникелевым) покрытием находится ячеистая бронзовая прослойка, на которую оно наносится. Наиболее эффективным методом толщинометрии никелевых покрытий является магнитный. Чтобы обеспечить заданный диапазон измерений (до ~700 мкм), необходимо достаточно сильное намагничивающее поле, обеспечивающее в объеме информативной зоны первичного преобразователя намагниченность никеля, близкую к его намагниченности насыщения. При этом устраняется или минимизируется дополнительная погрешность измерений, обусловленная магнитными (структурными) свойствами покрытий, которые в сильной степени зависят от технологии нанесения и толщины никеля. Ранее мы показали, что магнитодинамический метод толщинометрии и прибор МТНП-1 при энергии постоянного магнита первичного преобразователя ~180 мДж обеспечивают диапазон измерений до ~1000 мкм и более, полную отстройку от влияния структурных свойств никелевых покрытий на погрешность измерений. Прибор сертифицирован с основной погрешностью $\pm 3\%$ (свидетельство № 40481 об утверждении типа толщиномеров никелевых покрытий магнитных МТНП-1, зарегистрированных в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации под № 44898-10). Таким образом решена задача контроля никелевых покрытий на неферромагнитных основаниях с высокой точностью и полной отстройкой от влияния структурных свойств никеля на результаты измерений. При этом не возникает проблем с метрологическим обеспечением приборов, так как меры толщины покрытий для их градуировки и поверки могут быть изготовлены как по любой из существующих технологий гальванического осаждения, так и механической обработкой пластин из никеля.

Задача контроля покрытий камер сгорания гораздо сложнее; она не сводится к случаю никелевых покрытий на неферромагнитном основании. Реально мы имеем трехслойную структуру: никелевое покрытие – бронзовая прослойка – ферромагнитный корпус двигателя. Первичное намагничивающее поле преобразователя, обеспечивающее заданный диапазон измерений и исключение структурной составляющей погрешности, не локализуется в объеме покрытия, приводит к намагничиванию корпуса. В этом случае величина информативного сигнала определяется как намагниченностью (толщиной) никеля, так и намагниченностью корпуса. Последняя составляющая является мешающим фактором, определяющим дополнитель-

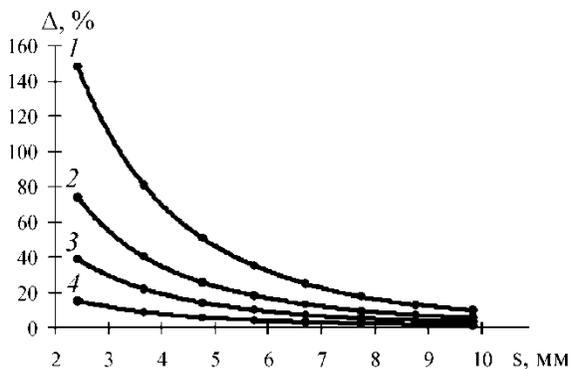


Рис. 1. Зависимость дополнительной погрешности Δ , обусловленной ферромагнитным корпусом, от толщины s бронзовой прослойки при разной толщине никеля:

кривая 1 – никель толщиной 90 мкм, 2 – 190 мкм,
3 – 340 мкм, 4 – 560 мкм

ную погрешность измерений, величина которой зависит как от толщины никеля, так и бронзовой прослойки. Мы провели экспериментальные исследования этой величины для пяти типов ракетных двигателей. Для одного из них результаты показаны на рис. 1; аналогичный характер зависимости имеет место и в других случаях.

Величина дополнительной погрешности в большой степени зависит от толщины прослойки и толщины никеля, снижаясь с их ростом. Общим результатом выполненных исследований является следующее: при практической необходимости обеспечить контроль разных типов камер сгорания, по поверхности которых покрытие варьируется в диапазоне 150...700 мкм, бронзовая прослойка – в пределах ~3...10 мм, погрешность измерений достигает десятков процентов. Следовательно, в этом случае невозможно приблизиться к погрешности измерений $\pm 3\%$, если не скомпенсировать величину дополнительной погрешности, обусловленной корпусом. Функциональные возможности приборов МТНП-1 позволяют измерять, запоминать и компенсировать сигнал от корпуса. Принципиальная трудность при этом связана с тем, что дополнительная погрешность зависит как от толщины прослойки, так и никеля. Эта задача решена применительно к каждому из исследованных типов двигателей. Численными расчетами, экспериментально на моделях и фрагментах камер сгорания установлен характер зависимости величины сигнала, обусловленного корпусом, от толщин прослойки и никеля. Эти зависимости описывались аналитическими уравнениями, которые вводятся в память прибора и используются для корректировки основной градуировочной зависимости, строящейся по сертифицированным мерам толщины покрытий и постоянно хранящейся в памяти прибора.

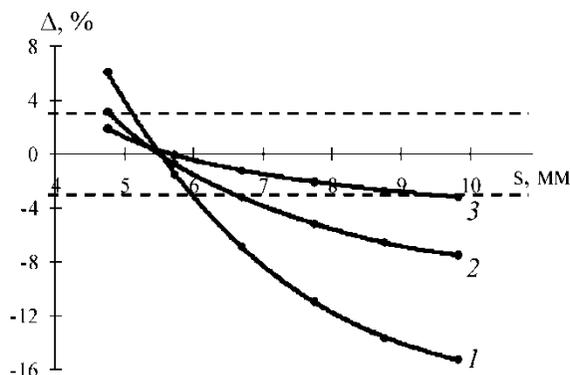


Рис. 2. Зависимость дополнительной погрешности Δ , обусловленной ферромагнитным корпусом, от толщины s бронзовой прослойки после настройки нуля, выполненной на ферромагнитной пластине толщиной $\sim 5,4$ мм, при разной толщине никеля: кривая: 1 – никель толщиной 190 мкм; 2 – 340 мкм; 3 – 560 мкм

Операцию корректировки этой зависимости назовем «настройкой нуля». Одновременно с этим решается задача метрологического обеспечения приборов, так как, не используя функцию «настройки нуля», мы имеем возможность провести обычную поверку приборов по мерам толщины покрытий; эта функция также не используется при отсутствии мешающих факторов.

Практически методика контроля никелевых покрытий сводится к «настройке нуля» прибора на изделии до нанесения покрытия, на фрагментах изделия либо на ферромагнитных пластинах, накладываемых на массивный образец из материала корпуса двигателя. Существенным является то, что при любом способе «настройки нуля» нет необходимости в дополнительных корректировках основной градуировочной зависимости прибора, учитывающих толщину никеля.

Конечный практический результат, который достигается для одного из типов ракетных двигателей при контроле никелевых покрытий, показан на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что «настройка нуля» на ферромагнитной пластине толщиной $\sim 5,4$ мм обеспечивает трехпроцентную погрешность измерений (обозначена штриховыми линиями) при вариации толщины прослойки $\sim 4,5 \dots 6,5$ мм. Для всех исследованных типов двигателей установлено, что для контроля никелевых покрытий с погрешностью не более $\pm 3\%$ достаточно выполнить «настройку нуля» для двух значений толщины бронзовой прослойки. Функциональные возможности приборов МТНП-1 обеспечивают измерение, запоминание и использование до тысячи различных «настроек нуля» в разных зонах и точках контроля.

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОПОРОШКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Бакунов А.С., Кудрявцев Д.А., Ефимов А.Г., Онегин М.А.
ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

Доклад посвящен теме повышения чувствительности магнитопорошкового метода контроля путем определения параметров магнитной коагуляции, подходящих для выявления дефектов, и создания условий проведения магнитопорошкового контроля для получения данных параметров на практике.

Чувствительность магнитопорошкового метода определяется многими параметрами: напряженностью и характером намагничивающего поля, свойствами и размерами частиц магнитного порошка, вязкостью магнитной суспензии, свойствами поверхностно-активных добавок и др. При проведении магнитопорошкового контроля частицы магнитного порошка, попадая в магнитное поле, намагничиваются и притягиваются друг к другу, образуя цепочки, ориентированные по магнитным силовым линиям поля. Процесс образования цепочек из частиц порошка называют магнитной коагуляцией.

Выявляемость дефектов непосредственно связана с интенсивностью магнитной коагуляции. Интенсивная магнитная коагуляция делает индикаторные рисунки нечеткими, вызывает значительный фон из порошка, что значительно затрудняет расшифровку осадений порошка. Кроме этого, осаждение порошка происходит не только над трещинами, но и над рисками, над местами грубой обработки поверхности. Короткие цепочки позволяют получить четкий рисунок над дефектами с большим градиентом поля (над усталостными, шлифовочными трещинами, волосовинами и др.). Они слабо осаждаются в полях малого градиента (над рисками, наклепом, карбидной полосчатостью и др.). Учитывая различную чувствительность цепочек к полям с различными значениями градиента поля можно, в зависимости от типа выявляемых дефектов, создать условия формирования цепочек частиц определенной длины, что позволит достигнуть высокой чувствительности к дефектам, подлежащим выявлению.

Расчет условий формирования цепочек частиц нужной длины затрудняет факт неоднородности поля над дефектом, под действием которого и происходит окончание процесса магнитной коагуляции и осаждение полученных цепочек частиц магнитного порошка над дефектом. В известных работах по магнитной коагуляции частиц магнитных суспензий (порошков) процесс формирования цепочек частиц в неоднородном магнитном поле дефекта не исследовался.

При попадании частицы магнитного порошка во внешнее магнитное поле вокруг нее возникает магнитное поле, представляющее собой сумму полей магнитостатических зарядов намагниченных частиц и внешнего маг-

нитного поля. Составляющие напряженности этого поля будут следующими:

$$H_x(x-x_0, y-y_0) = \frac{-LS(B(x, y) - \mu_0 H^1)(x-x_0)}{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \sqrt{\frac{L}{\sqrt{S}}} + \sqrt[3]{4L^2 S^{\frac{3}{4}}} \right)^3 \mu_0};$$

$$H_y(x-x_0, y-y_0) = \frac{-LS(B(x, y) - \mu_0 H^1)(y-y_0)}{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \sqrt{\frac{L}{\sqrt{S}}} + \sqrt[3]{4L^2 S^{\frac{3}{4}}} \right)^3 \mu_0},$$

где L – длина частицы (цепочки), отнесенная к длине вектора координат; S – площадь поперечного сечения частицы; $B(x, y)$ – магнитная индукция; μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме; H^1 – напряженность намагничивающего магнитного поля; x, y – координаты точки измерения напряженности; x_0, y_0 – координаты частицы (середины цепочки частиц).

Исходя из анализа сил, действующих на частицу порошка в магнитном поле (силы магнитного взаимодействия частиц и сила сопротивления движению частиц в суспензии), были выведены формулы составляющих скорости перемещения и координат j -той частицы (цепочки):

$$u_{xj}(t) = \int_0^t \frac{pw \left(\sum_{i=1}^{i=R} H_{xj} (x_i(t) - x_j(t), y_i(t) - y_j(t) - 6\pi \frac{d}{2} \nu u_{yj}(t) (1 - (n-1)\xi(n)) \right)}{m} dt;$$

$$u_{yj}(t) = \int_0^t \frac{pw \left(\sum_{i=1}^{i=R} H_{yj} (x_i(t) - x_j(t), y_i(t) - y_j(t) - 6\pi \frac{d}{2} \nu u_{xj}(t) (1 - (n-1)\xi(n)) \right)}{m} dt;$$

$$x_j(t) = x_{0j} + \int_0^t u_{xj}(x_j - x_{0j}, y_j - y_{0j}) dt;$$

$$y_j(t) = y_{0j} + \int_0^t u_{yj}(x_j - x_{0j}, y_j - y_{0j}) dt,$$

где p – магнитная восприимчивость частицы; w – объем частицы; d – диаметр частицы; ν – динамическая вязкость дисперсионной среды; u_x и u_y – составляющие вектора скорости движения частиц; n – число час-

тиц в цепочке; $\zeta(n)$ – поправочный коэффициент на нелинейность формулы; m – масса частицы (цепочки); R – общее число частиц.

Критерий объединения частиц в цепочки: если расстояние между координатами x и y любых пар частиц (цепочек) становится меньше или равно диаметру сферы действия магнитных зарядов $2r$, то частицы (цепочки) считаются объединившимися.

Полученные формулы координат частиц в текущий момент времени t позволяют произвести расчет параметров магнитной коагуляции по алгоритму:

Задается случайное расположение R частиц, затем рассчитываются напряженности и силы взаимодействия всех R частиц, определяются их скорости и координаты. Проверяется расстояние между частицами, ищутся частицы, объединившиеся в цепочки. Все полученные данные заносятся в массив, затем определяются скорости и координаты частиц через период дискретизации $\Delta t = 0,01$ с, вновь рассчитываются напряженности и силы взаимодействия всех частиц и проверяется расстояние между ними и т.д.

Задав размер частицы, концентрацию порошка в суспензии, вязкость суспензии, размеры дефектов, размеры области намагничивания и величину напряженности намагничивающего поля, можно получить зависимость длины получаемых в процессе магнитной коагуляции цепочек частиц от времени намагничивания и полива. Таким образом определяется время намагничивания t_n , необходимое для образования цепочек с длиной, требуемой для качественного и надежного выявления дефектов заданных размеров.

Использование приведенного алгоритма позволяет создать условия проведения магнитопорошкового контроля, при которых в процессе магнитной коагуляции формируются цепочки частиц определенной длины с целью получения высокой чувствительности к дефектам, подлежащим выявлению.

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ РАСТЯГИВАЮЩИХ УПРУГИХ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Костин К.В., Царькова Т.П., Смородинский Я.Г.
*Институт физики металлов УрО РАН, 620041, Екатеринбург,
ул. С. Ковалевской, 18*

Одним из наиболее опасных и трудно выявляемых дефектов является растрескивание трубных сталей в коррозионной среде под действием растягивающих напряжений (КРН). Своевременное обнаружение мест концентрации и определение уровня этих напряжений позволит оценивать остаточный ресурс трубопроводов и устанавливать сроки и объемы необходимого ремонта трубопроводов.

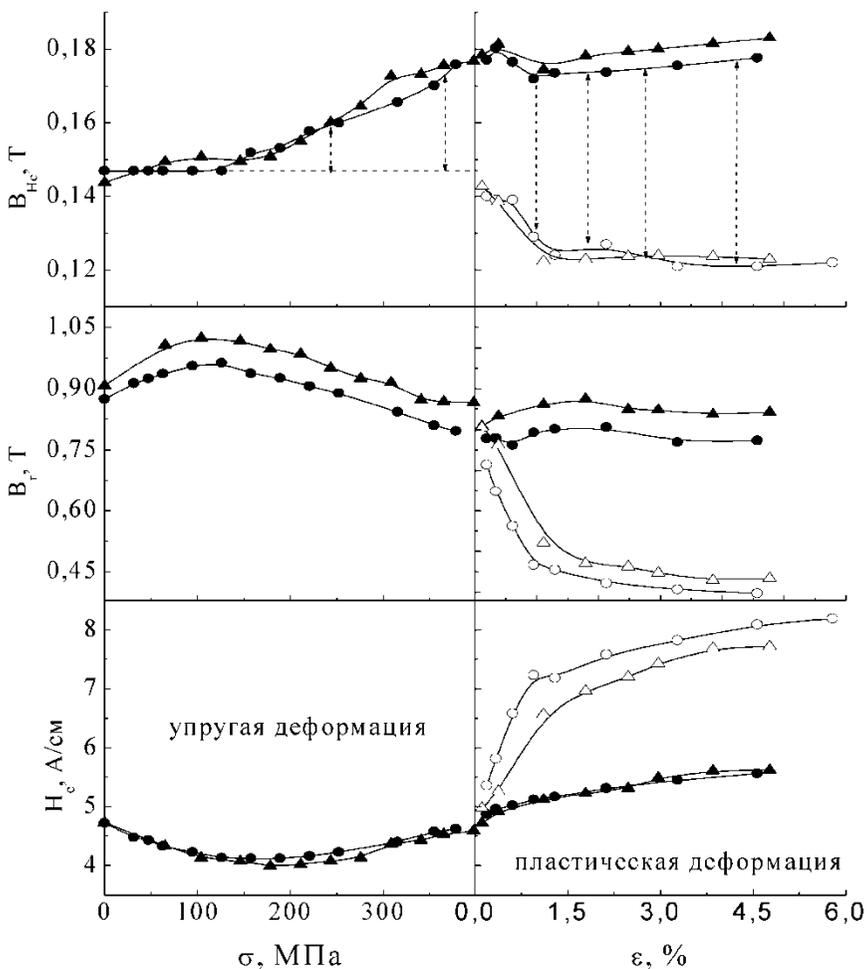


Рис. 1

На рис. 1 представлены зависимости коэрцитивной силы H_c , остаточной магнитной индукции B_r и индукции коэрцитивного возврата B_{HC} от упругих и пластически деформирующих растяжений для исследованных образцов. При упругом растяжении величины H_c и B_r меняются слабо и немонотонно, что не позволяет считать их приемлемыми параметрами контроля. Индукция коэрцитивного возврата B_{HC} трубных сталей монотонно растет при увеличении упругих растягивающих напряжений. Рост величины продолжается при напряжениях выше предела текучести. Снятие плас-

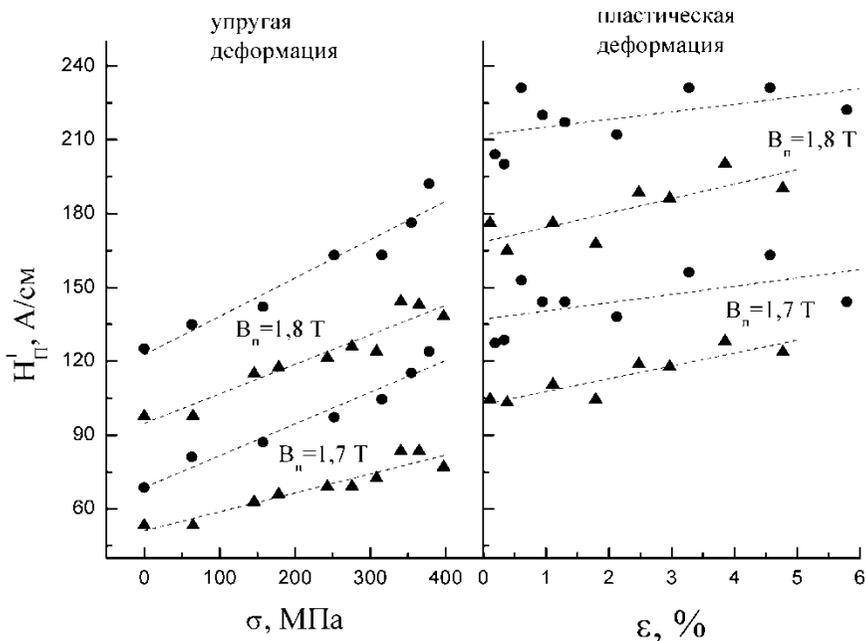


Рис. 2

тически деформирующего напряжения приводит к снижению индукции коэрцитивного возврата ниже уровня, характерного для ненагруженных сталей, причем величина B_{Hc} разгруженных сталей уменьшается по мере роста деформаций. Таким образом, по изменению величины B_{Hc} можно не только оценивать величину упругих растягивающих напряжений, но и обнаруживать появление и оценивать величину начинающихся пластических деформаций как в нагруженном, так и в разгруженном состояниях.

Установлено, что в наибольшей степени под действием упругих и пластических растягивающих деформаций меняются участки предельной и несимметричной петель гистерезиса соответствующие перемагничиванию преимущественно смещением 90° доменных границ. На рис. 2 показана возможность контроля растягивающих деформаций по величине магнитного поля H_p^1 , соответствующего фиксированной намагниченности B_H на нисходящей ветви предельной петли гистерезиса. Указанный параметр интенсивно и практически линейно растет во всем диапазоне изменения упругих напряжений, причем рост величины H_p^1 продолжается и при пластически деформирующих нагрузках.

Измерение предложенных магнитных параметров контроля практически реализуется с помощью малогабаритной мобильной аппаратно-программной системы СИМТЕСТ-2.11.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН (проект 09-П-2-1001 «Анализ, моделирование и экспериментальное исследование топологии магнитных и акустических полей в ферромагнитных объёмах»).

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ НОВЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ (Fe-Cr-Ni-Co-Mo-Al) СТАЛЕЙ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО ИХ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Горулева Л.С.¹, Горкунов Э.С.¹, Задворкин С.М.¹, Мальцева Л.А.²,
Мальцева Т.В.², Левина А.В.²

¹*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

²*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

Разработка новых сталей и сплавов, обладающих повышенной технологичностью, высокими прочностными свойствами в сочетании с высокой коррозионной стойкостью, является важной задачей. Во многих коррозионностойких сталях при силовом воздействии протекают фазовые превращения, приводящие к образованию ферромагнитной ОЦК-фазы, что в значительной степени определяют их коррозионную стойкость и другие физико-механические свойства. В связи с этим актуальной является разработка неразрушающих методов оценки состояния новых безуглеродистых сталей, как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации изделия, на основе измерения магнитных характеристик.

В докладе приведены результаты исследования сталей нового поколения с марочным составом 03X14N11K5M2ЮТ (три плавки) и 03X14N11KM2ЮТ и 03X14N10K5M2Ю2Т (по одной плавке) в состоянии после закалки (от 1000 °С в воду) на пересыщенный твердый раствор. Химический состав исследованных сталей представлен в табл. 1. Принципиальным отличием этих сталей является низкое содержание углерода, широкая база легирования такими элементами как Cr, Ni, Mo, Ti, Co, которые способствуют повышению коррозионной стойкости и теплостойкости, а также Al, варьирование содержания которого позволяет осуществлять контролируемый перевод этих сталей в разные структурные классы: стали,

1. Химический состав исследованных сталей

Марка стали	№ плавки	Содержание элементов, масс. %*								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	Al
03X14N11K5 M2ЮТ	1	≤ 0,03	0,21	0,19	15,1	11,15	2,6	4,5	0,28	0,8
03X14N11K M2ЮТ	2	≤ 0,03	0,30	0,08	15,7	10,52	2,7	0,7	0,36	0,98
03X14N11K5 M2ЮТ	3	≤ 0,03	0,27	0,20	15,7	10,0	2,4	6,1	0,4	1,3
03X14N11K5 M2ЮТ	4	≤ 0,03	0,30	0,23	14,6	10,9	2,5	5,1	0,3	0,9
03X14N10K5 M2Ю2Т	5	≤ 0,03	0,22	0,09	14,2	10,1	2,45	4,97	0,28	2,6

* Содержание S и P не более 0,025 %.

содержащие 0,8...1,3 % Al, относятся к аустенитному классу, 2,6 % Al – к аустенитно-ферритному. Кроме того, кобальт понижает энергию дефектов упаковки и подавляет образование α' -мартенсита, что позволяет деформировать кобальтсодержащие стали до более высоких степеней деформирования при сохранении пластичности материала.

Структура исследуемых аустенитных сталей в закаленном состоянии характеризуется, по данным рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа, наличием до 5 % ОЦК-фазы, присутствием незначительного количества интерметаллидов Ni_3Ti , $FeCrMo$ и, в зависимости от содержания Co, $(Fe, Ni)_{42}Cr_{13}Mo_2Al$ или $(Fe, Ni)_{39}Cr_{14}Mo_2Co_2Al$. О наличии небольшого количества ферромагнитной фазы (ОЦК-фазы) в сталях 03X14N11KM2ЮТ и 03X14N11K5M2ЮТ свидетельствуют магнитные измерения. В структуре стали 03X14N10K5M2Ю2Т содержится 33 % и 67 % соответственно ОЦК- и ГЦК-фазы (табл. 2). Все исследуемые стали превосходят по уровню механических свойств коррозионностойкую сталь 12X18N10Т промышленной выплавки (табл. 3). Наиболее высокими прочностными характеристиками ($\sigma_b = 960$ МПа, $\sigma_{0,2} = 720$ МПа) и при этом достаточной пластичностью ($\delta = 17$ %) обладает аустенитно-ферритная сталь 03X14N10K5M2Ю2Т.

Коррозионные испытания показали, что после выдержки в 3%-ном растворе NaCl в течение 400 ч потери массы образцов исследованных сталей на порядок меньше, чем в стали 12X18N10Т.

2. Фазовый состав исследованных сталей в закаленном состоянии и после механических испытаний (растяжение и кручение)

Марка стали	№ плавки	Содержание фаз, %					
		До испытаний		После растяжения		После кручения	
		ОЦК-фаза	ГЦК-фаза	ОЦК-фаза	ГЦК-фаза	ОЦК-фаза	ГЦК-фаза
03X14H11K5M2ЮТ	1	< 2	> 98	63	27	55	45
03X14H11KM2ЮТ	2	< 2	> 98	95	5	88	12
03X14H11K5M2ЮТ	3	5	95	75	25	77	23
03X14H11K5M2ЮТ	4	< 2	> 98	> 98	< 2	90	10
03X14H10K5M2Ю2Т	5	33	67	> 98	< 2	> 98	< 2

Рентгеноструктурный анализ поверхностей излома показал, что после механических испытаний на растяжение и кручение содержание ОЦК-фазы увеличилось для аустенитных сталей до 63...98 % и до 55...90 %, соответственно, а для аустенитно-ферритной стали – не менее 98 % (см. табл. 2). В то же время результаты измерения намагниченности насыщения M_s разрушенных образцов свидетельствуют о том, что содержание ОЦК-фазы на некотором удалении от области разрушения не превосходит 22 % для аустенитных сталей и 46 % для аустенитно-ферритной стали.

При проведении механических испытаний исследованных сталей изучали влияние упругопластического деформирования на их магнитные характеристики (коэрцитивную силу H_c , максимальную магнитную проницаемость μ_{\max} , остаточную индукцию B_r и M_s). При упругой деформации

3. Механические характеристики исследованных сталей

Марка стали	Обработка	№ плавки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\tau_{0,3}$, МПа	$\tau_{пр}$, МПа
12X18H10Т*	Закалка 1050 °С	–	196	510	40	–	–
03X14H11K5M2ЮТ	Закалка 1000 °С	1	250	557	49	240	730
03X14H11KM2ЮТ		2	240	574	48	260	745
03X14H11K5M2ЮТ		3	260	613	34	260	690
03X14H11K5M2ЮТ		4	245	549	49	290	880
03X14H10K5M2Ю2Т		5	720	959	17	640	1100

* По требованиям ГОСТ 5949–75.

изменение M_s не превышает погрешности измерений. Монотонное возрастание M_s , свидетельствующее об образовании мартенсита деформации в сталях аустенитного класса, происходит лишь при напряжениях, более чем в 2 раза превышающих пределы текучести при растяжении и кручении $\sigma_{0,2}$ и $\tau_{0,3}$, соответственно. Для стали аустенитно-ферритного класса увеличение M_s происходит при напряжениях, превышающих величины $\sigma_{0,2}$ и $\tau_{0,3}$. Таким образом, в упругой области фазовый состав исследуемых сталей не претерпевает изменений, а в области развитой пластической деформации для контроля их фазового состава возможно использование намагниченности напыщения.

Такие параметры аустенитных сталей 03X14N11K5M2ЮТ и 03X14N11KM2ЮТ как H_c , B_r и μ_{\max} при упругой деформации остаются постоянными, их изменения начинаются при достижении предела текучести. Для аустенитно-ферритной стали на зависимостях H_c , B_r и μ_{\max} от приложенных напряжений имеются экстремумы, обусловленные магнитоупругим эффектом. Однако в интервале от 0 до $\approx 0,6\sigma_{0,2}$ наблюдается монотонный характер этих зависимостей. Соответственно, в этом интервале имеется принципиальная возможность оценки напряжений в изделиях из стали 03X14N10K5M2Ю2Т по магнитным измерениям.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ и правительства Свердловской области 10-08-96057-р_урал_a и проекта ОЭММПУ РАН 09-Т-1-1002.

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 09Г2С, УПРОЧНЕННОЙ РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ, ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Горулева Л.С.¹, Горкунов Э.С.¹, Задворкин С.М.¹, Туева Е.А.¹,
Веселов И.Н.², Яковлева С.П.³, Махарова С.Н.³, Мордовской П.Г.³

¹*Институт машиноведения УрО РАН,*

Екатеринбург, Россия

²*Екатеринбургский филиал ОАО «РосНИТИ»,*

Екатеринбург, Россия

³*Институт физико-технических проблем Севера,*

Якутск, Россия

Технология равноканального углового прессования (РКУП) является перспективным методом повышения прочностных характеристик материалов. Однако исследованиям влияния РКУП на физико-механические свойства таких наиболее широко применяемых конструкционных материалов, как стали, посвящено сравнительно небольшое число работ. В связи с этим актуальной является, в частности, задача создания неразрушающих мето-

дов определения механических свойств сталей, упрочненных с помощью РКУП.

В докладе приведены результаты исследования магнитных характеристик (коэрцитивной силы H_c , максимальной магнитной проницаемости μ_{\max} , среднеквадратичного значения напряжений магнитных шумов Баркгаузена U , числа скачков Баркгаузена N) и механических характеристик стали 09Г2С, подвергнутой РКУП по разным режимам, с целью определения возможностей магнитной структуроскопии для оценки уровня механических свойств и текущего состояния изделий из этого материала.

Сталь 09Г2С подвергали РКУП по режимам: 1 – температура прессования $T = 350$ °С, число проходов $Q = 2$, маршрут А (без поворота образца между проходами); 2 – $T = 350$ °С, $Q = 2$, маршрут С (с поворотом образца между проходами на 180°); 3 – $T = 500$ °С, $Q = 2$, маршрут А; 4 – $T = 500$ °С, $Q = 4$, маршрут А.

РКУП привело к повышению временного сопротивления (σ_b) в 1,4...1,7 раза, условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) – в 1,7...2 раза, твердости (HV) – примерно в 1,5 раза (см. табл.). Значительно возросло отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, что свидетельствует о возрастании опасности хрупкого разрушения материала. Наибольшее значение σ_b и наименьшее отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ достигаются при обработке РКУП по режиму 2. Однако, после такой обработки сталь имеет очень низкую величину относительного удлинения: $\delta = 2,5$ %. Некоторое понижение характеристик прочности при обработке по режиму 3 компенсируется улучшением пластичности. Наилучшее сочетание прочности и пластичности достигается при РКУП по режиму 1.

Физико-механические свойства стали 09Г2С, подвергнутой РКУП

Режим РКУП	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	HV , кг/мм ²	H_c , А/см	μ_{\max}	U , мВ	$N, \times 10^2$
Исходное состояние	590	460	22,2	72,1	190	4,8	1160	605	202
1	995	935	4,8	47,7	304	7,2	663	370	228
2	1030	915	2,5	46,0	288	7,5	592	320	258
3	810	795	5,8	51,3	267	6,1	901	442	208
4	840	805	4,8	45,2	268	8,7	392	709	227

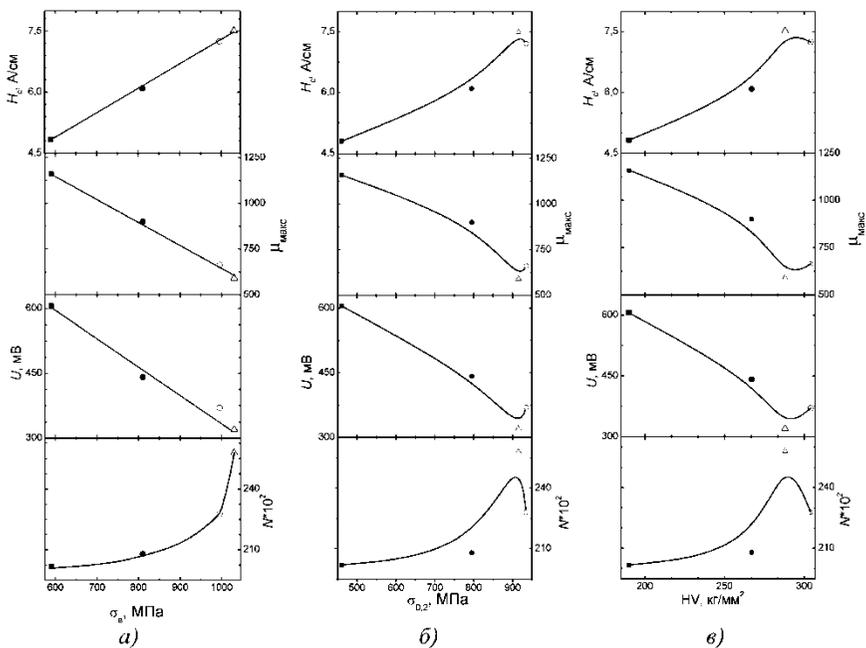


Рис. Зависимости магнитных характеристик стали 09Г2С, подвергнутой РКУП с числом проходов 2, от временного сопротивления (а), условного предела текучести (б) и твердости (в):

■ – исходное состояние; РКУП по режиму:
1 – о; 2 – Δ; 3 – ●

Характер разрушения для стали в исходном состоянии вязкий ямочный. После РКУП характер разрушения стали меняется: на поверхностях излома наблюдаются участки вязкого разрушения с небольшой глубиной ямок, что свидетельствует о пониженной способности материала к пластической деформации, а также ярко выраженные ступеньки, которые образовались в результате соединения поверхностей разрушения, расположенных на разных уровнях, что характерно для квазихрупкого разрушения.

Для стали, подвергнутой РКУП с $Q = 2$, наблюдается однозначная связь между магнитными характеристиками и $\sigma_{\text{в}}$, вне зависимости от T и маршрута (см. рис.). В то же время значения $H_{\text{с}}$, U , N и $\mu_{\text{макс}}$ материала после РКУП по режиму 4 ($Q = 4$) не укладываются на эту зависимость. Таким образом, оценка величины $\sigma_{\text{в}}$ стали 09Г2С после РКУП по магнитным измерениям возможна только при неизменном числе проходов.

В отличие от зависимостей магнитных характеристик материала от его временного сопротивления, на аналогичные зависимости от условного предела текучести и твердости HV оказывает существенное влияние не только число проходов, но и маршрут РКУП: на графиках $H_c(\sigma_{0,2})$, $N(\sigma_{0,2})$, $\mu_{\max}(\sigma_{0,2})$, $U(\sigma_{0,2})$ и $H_c(HV)$, $N(HV)$, $\mu_{\max}(HV)$, $U(HV)$ наблюдаются экстремумы, отвечающие материалу после РКУП по маршруту С (см. рис.). Таким образом, магнитный контроль величин $\sigma_{0,2}$ и HV стали, подвергнутой РКУП при различных температурах прессования, возможен только при условии неизменности маршрута и числа проходов.

При проведении механических испытаний изучали влияние упругопластического деформирования одноосным растяжением на H_c и μ_{\max} . В интервале от 0 до $(0,2 \dots 0,6)\sigma_{0,2}$ (в зависимости от режима РКУП) наблюдаются однозначные зависимости H_c и μ_{\max} от приложенных напряжений. Это позволяет использовать магнитные характеристики для оценки упругих напряжений в изделиях из стали 09Г2С, упрочненной по технологии РКУП, в процессе эксплуатации.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта молодых ученых и аспирантов УрО РАН 2011 года «Влияние режимов равноканального углового прессования на структуру и физико-механические свойства конструкционной стали 09Г2С», проекта Президиума РАН № 09-П-1-1008 и проекта ОЭМПУ РАН № 09-Т-1-1002.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА В СРАВНЕНИИ С ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ НК И СРЕДСТВАМИ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Дубов А.А., Колокольников С.М.
ООО «Энергодиагностика», Москва, Россия

Сварка в мире существует более 100 лет, а самый главный фактор, определяющий надежность сварного соединения, – распределение остаточных сварочных напряжений, до сих пор не контролируется из-за отсутствия методов НК, пригодных для использования в широкой практике.

В настоящее время в России разработан и успешно внедряется в различных отраслях промышленности принципиально новый метод диагностики металла изделий и сварных соединений, основанный на использовании эффекта магнитной памяти металла (МПМ). Метод направлен на решение указанной проблемы, и его разработка доведена до уровня российских и международных стандартов.

Метод МПМ – метод неразрушающего контроля, основанный на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР), сформировавшегося естественным образом в процессе сварки.

Путем считывания СМПР предоставляется уникальная возможность в режиме экспресс-контроля выполнять интегральную оценку фактического состояния сварного шва с учетом структурной неоднородности, распределения остаточных напряжений и дефектов сварки. При этом никакой подготовки поверхности металла шва не требуется.

В статье представлены критерии оценки состояния сварных соединений трубопроводов по результатам контроля методом МПМ. Приведены результаты сравнительного контроля сварных соединений трубопроводов различных типоразмеров методом МПМ и традиционными методами НК (радиография, ультразвуковой контроль).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО ПАРАМЕТРАМ ТВЕРДОСТИ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЯВЛЕННЫХ В ИЗДЕЛИЯХ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА

Матюнин В.М.¹, Дубов А.А.²,

¹*МЭИ-ТУ, Москва, Россия,*

²*ООО «Энергодиагностика», Москва, Россия*

Известно, что основными источниками повреждений оборудования и конструкций являются зоны концентрации напряжений (ЗКН), обусловленные технологическими дефектами изготовления, рабочими нагрузками или их сочетанием. Наличие ЗКН, как на новых изделиях, так и на изделиях, бывших в эксплуатации, значительно снижает их ресурс. Поэтому контроль напряженно-деформированного состояния изделий и определение ЗКН с использованием средств неразрушающего контроля представляется в ГОСТ Р 52330-2005 наиболее важной задачей при контроле НДС. Именно для решения этой задачи – выявление ЗКН на основе 100% обследования оборудования и конструкций, предлагается использовать метод магнитной памяти металла (МПМ), который получает все большее распространение на практике.

После того, как выявлены ЗКН, при оценке ресурса требуется определить механические свойства металла в этих зонах. Однако, определение механических свойств металла в ЗКН, имеющих малую протяженность (от единиц до нескольких десятков мкм), весьма проблематично.

Из существующих методов контроля механических свойств для этих целей наиболее перспективен метод индентирования. Этот метод, известный под названием «безобразцовый метод», позволяет определять не толь-

ко характеристики твердости, но и показатели других механических свойств металла, например, предел текучести ($\sigma_{0,2}$), временное сопротивление (σ_B), равномерную деформацию (δ_p) и др. [1]. В основе безобразцового метода лежат корреляционные связи характеристик твердости с характеристиками прочности, но эти связи установлены для макроуровня, на котором деформируемые объемы металла при вдавливании индентора и растяжении образца сравнительно велики. При уменьшении деформируемых объемов металла начинает проявляться масштабный фактор, следствием которого является повышение определяемых значений твердости и прочности.

В связи с вышеизложенным возникает вопрос о характере связи твердости и прочности на микро- и макроуровне и возможности их взаимного пересчета. Для обоснованного ответа на этот вопрос необходимо было установить закономерности изменения характеристик твердости и прочности при переходе от макро- к микроуровню деформирования металла.

Для ответа на эти вопросы при проведении экспериментов были приняты следующие два условия подобия. Первое условие обеспечивает одинаковые масштабные уровни при растяжении и вдавливании за счет равенства абсолютного изменения площади поперечного сечения образца ΔF и площади поверхности отпечатка M ($\Delta F = M$). А второе условие обеспечивает при этом равенство относительных деформаций при растяжении образца $\Psi^{\text{рас}}$ и вдавливании индентора $\Psi^{\text{вд}}$ ($\Psi^{\text{рас}} = \Psi^{\text{вд}}$).

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования на кафедре технологии металлов МЭИ позволяют на практике, используя полученные из условий подобия номограммы, определять в ЗКН, выявленных методом МПМ, механические характеристики металла на основе измеренных показателей микро- и макротвердости.

Разработанная методика определения твердости в ЗКН в сочетании с методом МПМ имеет большое практическое значение при оценке ресурса оборудования.

КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ БЕЗ СНЯТИЯ ИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ И МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА

Дубов А.А.

ООО «Энергодиагностика», Москва, Россия

В промышленных исследованиях установлено, что основными источниками развития всех видов повреждений трубопроводов, в том числе и коррозионных, являются зоны концентрации напряжений (ЗКН), возникновение которых обусловлено неудачным сочетанием ряда факторов: технологических, монтажных, конструктивных и эксплуатационных (рабочих нагрузок).



Рис. 1. Общий вид СУ для контроля труб \varnothing 200–1420 мм

В ЗКН и в зонах развивающихся повреждений возникают магнитные аномалии, амплитуда и периодичность которых связаны с деформацией трубопроводов и видом коррозионно-усталостного повреждения (утонение стенки трубы на протяженном участке, язвины с наружной и внутренней поверхности трубы и т.д.). Таким образом, основной задачей при анализе результатов контроля теплопроводов бесконтактным магнитометрическим методом является выявление аномалий в распределении магнитного поля и установление связи этих аномалий с ЗКН и различными видами развивающихся повреждений.

При контроле трубопроводов через слой изоляции используются критерии, разработанные в методе магнитной памяти металла (МПМ).

В ЗКН деформация трубопровода происходит вместе со слоем изоляции, жестко связанной с трубой. Даже в случае наличия в изоляции скрепляющей сетки «рабица», информация о нерасчетной деформации трубы передается через деформацию сетки в виде магнитных аномалий, фиксируемых на поверхности изоляции.

Сканирующее устройство, которое используется для контроля трубопроводов через слой изоляции, имеет 16 каналов измерений нормальной составляющей магнитного поля (рис. 1).

В зонах выявленных магнитных аномалий рекомендуется выполнить контроль вдоль периметра трубопровода с целью определения зоны максимальной концентрации напряжений в данном сечении трубопровода, которая соответствует максимальному значению градиента магнитного поля.

По результатам бесконтактного (через слой изоляции) магнитометрического контроля трубопровода выполняется анализ магнитограмм и намечаются контрольные участки (два-три участка на каждые 500 м длины трубопровода) для вскрытия изоляции и выполнения дополнительного неразрушающего контроля другими методами (метод МПМ, ультразвук, толщинометрия, визуально-измерительный контроль, вихретоковый метод).

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ПОД СТЕНКОЙ ТРУБОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО КОНТРОЛЯ

Мишин А.Р.

ОАО «Автогаз», Москва, Россия

Для обнаружения коррозионных дефектов и стресс-коррозионных дефектов при контроле трубопроводов используют дефектоскопы, работающие на принципе измерения магнитного поля рассеяния.

Принцип работы магнитных снарядов основывается на намагничивании стенок трубы с последующим обнаружением аномальных магнитных свойств металла в дефектных зонах. Величина измеренного потока от дефектной зоны зависит от многих параметров: величины намагничивающего поля, остаточной намагниченности стенки трубы, геометрии дефекта и т.п. Проблема заключается в том, что не все из этих параметров известны или контролируются, что делает затруднительным получение точных параметров дефектов.

Для получения достоверной информации о количественных характеристиках дефектов, необходимо учитывать влияние этих факторов. Одним из источников наиболее серьезных ошибок идентификации дефектов является степень намагниченности стенки трубы.

Степень намагниченности является разной для каждой трубы и нам неизвестной. На стенде для оценки гистерезиса для трубной стали, были сняты характеристики B_m от H (где B_m – магнитная индукция стенки трубы в Тл.; H – напряженность магнитного поля в А/м.), которые показали, что при заданной напряженности магнитного поля, наличие гистерезиса приводит к тому что величина B_m , сильно зависит от начального магнитного состояния материала труб.

При использовании напряженности магнитного поля в зоне контроля близкой к насыщению металла стенки трубы, данный эффект исчезает.

Данные исследования были использованы при проектировании дефектоскопа нового поколения КОД6М-1420.

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОПЕРЕЧНЫХ СВАРНЫХ ШВАХ ПРИ ВНУТРИТРУБНОМ МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Гамза Д.В.

ОАО «Автогаз», Москва, Россия

Внутритрубный магнитный контроль осуществляется при помощи магнитных проходных дефектоскопов. В них реализован метод утечки маг-

нитного поля. Измерительная система таких дефектоскопов состоит из блоков первичных преобразователей, обычно на жесткой основе, на которых установлены датчики. Датчики считывают тангенциальную составляющую магнитного над внутренней поверхностью трубы, по которой, при обработке результатов контроля, хорошо определяется топология дефектов. Намагничивание дефектоскопами стенок труб осуществляется либо вдоль трубы (коррозионные дефектоскопы), либо поперек трубы (стресс-коррозионные дефектоскопы).

В силу специфики магнитного метода, сварные швы будут «видны» только в поле, направленном перпендикулярно относительно направления шва. Следовательно, коррозионными дефектоскопами будут обнаруживаться только поперечные сварные швы, а стресс-коррозионными – только продольные.

Поперечные сварные швы по наличию аномалий делятся на три группы: швы без аномалий, швы с аномалией геометрии (при этом дефекты шва, такие как трещины, непровары и проч., не выявляются) и швы с выявляемыми дефектами.

В работе рассматриваются возможности идентификации поперечных сварных швов как по геометрии, так по наличию дефектов в самом сварном шве. Показано, что выявляемость дефектов в сварном шве на 10...20 % ниже по порогу, чем выявляемость подобных дефектов в основном теле трубы.

Полученные в работе данные были использованы при разработке комплекса «КОД-4М-1420у» и опробованы в ходе испытаний. На данный момент поиск аномалий сварных швов ведется оператором обработки данных «вручную». В дальнейшем планируется автоматизировать этот процесс.

SEEN INVISIBLE, FURTHER DEVELOPMENT FOR OPERATIONAL SAFETY

Isaac Einav, Richmond Hill,
Ontario, Canada

Явление магнитомеханического гистерезиса наблюдается, например, вблизи и в самой зоне пластического течения. А поскольку при монтаже стальных конструкций используется исходный материал, испытавший в процессе подготовки и монтажа многочисленные знакопеременные механические воздействия, в том числе и местные пластические деформации, известные измерители напряжений нередко дают ложные результаты. Алгоритм обработки информации, используемый в приборах «StressVision», позволяет решить эту проблему.

Магнитоанизотропные («крестовые») преобразователи, с которыми работают наши приборы, представляют собой два взаимно-перпендикулярных П-образных магнитопровода, на одном из которых располагается обмотка возбуждения, на другом – измерительные обмотки. Преобразователи используют анизотропию магнитных свойств, возникающую в ферромагнетике при нагружении внешней силой, и свободны от недостатков приборов, использующих магнито-упругие преобразователи.

Установлено, что связь между механическими напряжениями и магнитными свойствами среды характеризуется магнитоупругой чувствительностью:

$$\Lambda_B = \frac{\partial B}{\partial \sigma},$$

где B – магнитная индукция (характеризуется величиной и направлением действия); σ – механическое напряжение.

Принцип действия магнитоанизотропного преобразователя основан на эффекте поворота вектора магнитной индукции B , создаваемой первичной обмоткой в зоне измерений. Величина напряжения U на выходе измерительной обмотки ω описывается формулой

$$U = KB_c S_0 f_{II} \sin \beta \omega ,$$

где B_c – усредненное значение индукции; S_0 – площадь, охватываемая обмоткой; K – коэффициент пропорциональности; β – угол между плоскостью измерительной обмотки ω_2 и вектором магнитной индукции B ; f_{II} – частота питающего напряжения.

Формула получена для одинакового направления векторов $\vec{\sigma}$ и \vec{B} . Поворот вектора \vec{B} можно характеризовать изменением его ортогональных составляющих.

Более детальный анализ показывает, что выходной сигнал «крестового» магнитоанизотропного преобразователя сразу (т.е. до какой-либо обработки) выдает сигнал, пропорциональный разности главных механических напряжений (РГМН):

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} .$$

Полученный результат очень важен, так как согласно 3-у критерию прочности (критерий Треска) разрушение материала происходит, когда

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \geq \sigma_T .$$

Прибор позволяет определять РГМН в единицах измерения напряжений (МПа). Для оценки эксплуатационной опасности состояния металла на участке не столь важны сами напряжения, как места их концентрации и скорости изменения напряжений (градиенты). Дело в том, что в центрах (в максимумах) концентрации механических напряжений (КМН) зарождаются дефекты. Например, на нефтепроводах именно здесь развиваются свищи. Это – генераторы дислокаций. При достаточно высоких значениях градиентов эти дислокации начинают двигаться. В итоге рождаются трещины. Если на обследованном участке нет концентраторов и градиентов, то на этом участке металл не разрушится.

Обнаружив КМН и градиенты, определив их точные координаты и количественно оценив их развитие можем делать выводы о текущем техническом состоянии обследованного участка и приступать к оценке остаточного ресурса, принять обоснованные решения о целенаправленном (положение градиентов и концентраторов точно указано на картах) устранении концентраторов и градиентов, т.е. к устранению источников появления и развития дефектов.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИНДИКАТОРНЫХ РИСУНКОВ ДЕФЕКТОВ НА ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКЕ

Новиков Вл.А., Скрябина Г.И., Шилов А.Вл., Кушнер А.В.
Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

В последние годы для визуализации магнитных полей разработана специальная пленка, которая содержит залитые в гель частички никеля. В зависимости от своего расположения эти частицы по-разному отражают падающий свет. Пленка окрашивается в темные тона, когда магнитное поле направлено под прямым углом к ее поверхности и светлеет, когда направление магнитного поля параллельно поверхности. Другими словами, на пленку записывается как тангенциальная, так и нормальная составляющая магнитного поля.

В настоящее время описано применение таких пленок для визуализации полей, создаваемых постоянными магнитами и намагниченными объектами, по которым судят об их свойствах. Авторы ранее провели исследования по возможности применения такой пленки для визуализации полей рассеяния дефектов в ферромагнитных объектах. По появлению индикаторных рисунков на магнитной пленке можно установить наличие дефектов в изделии, однако сложно количественно оценить их параметры. Для количественной оценки индикаторных рисунков дефектов, с целью определения условий контроля, разработана программа, позволяющая значения

интенсивности изображений индикаторных рисунков на пленке попиксельно экспортировать в таблицы с разделением по цветам (RGB) и по усредненным значениям интенсивности изображений построить графики зависимостей для соответствующих цветов.

Исследовано влияние предварительной подготовки магнитной пленки, параметров несплошностей и условий контроля на количественные характеристики индикаторных рисунков. Установлена зависимость численных значений интенсивности окраски магнитной пленки, визуализирующей поле, от ее предварительной подготовки и напряженности действующего на нее намагничивающего поля. Рассмотрены вопросы количественной оценки индикаторных рисунков дефектов различного типа и вида, их параметров и условий контроля в приложенном поле и на остаточной намагниченности.

Вначале было исследовано влияние предварительной подготовки магнитной пленки на интенсивность ее окраски под действием нормальной и тангенциальной составляющих магнитного поля. Установлено, что интенсивность составляющих зеленого и синего цвета уменьшается при намагничивании пленки полем перпендикулярным ее поверхности напряженностью до 500 А/см, а затем стабилизируется. Значения интенсивности составляющей красного цвета изменяются незначительно; наибольшее численное значение интенсивности изображения предварительно восстановленной магнитной пленки наблюдается для составляющей зеленого цвета.

Для исследований по количественной оценке индикаторных рисунков *дефектов* применяли образцы с искусственными и естественными несплошностями различного вида и типа. Контроль объектов производили без предварительной зачистки поверхности деталей. Намагничивание деталей осуществляли постоянными магнитами или электромагнитом. Представленные ниже результаты экспериментальных исследований выполнены при различных режимах намагничивания при оптимальных углах наблюдения.

Установлено, что с увеличением глубины дефекта внутренней поверхности размах сигнала возрастает, причем при малых режимах намагничивания (до 96 А/см) крутизна кривых увеличивается с ростом глубины несплошности, при $H = 96$ А/см – остается постоянной, а при более высоких режимах – уменьшается при возрастании H . С увеличением напряженности поля размах сигнала сначала возрастает, а затем стабилизируется, причем, чем больше глубина несплошности, тем при меньшей напряженности поля происходит стабилизация размаха сигнала. Дефекту большей глубины соответствует больший размах сигнала. Ширина сигнала, обусловленного дефектом внутренней поверхности, с ростом ширины дефекта изменяется монотонно. Влияние ширины дефекта внутренней поверхности на размах обусловленного им сигнала, получаемого на пленке, в приложенном поле при низких напряженностях намагничивающего поля – немонотонна. В диапазоне режимов намагничивания $192 \text{ А/см} \leq H \leq 480 \text{ А/см}$ с ростом

ширины дефекта происходит резкий спад размаха сигнала. Размах сигнала, обусловленного дефектом наружной поверхности, для дефектов различной ширины с ростом напряженности намагничивающего поля сначала увеличивается, а затем плавно уменьшается и стабилизируется. При этом большому дефекту соответствует больший размах сигнала. Ширина сигнала, обусловленного дефектом внутренней поверхности, возрастает линейно с увеличением ширины дефекта, причем в диапазоне напряженностей $96 \text{ А/см} \leq H \leq 480 \text{ А/см}$ ширина сигнала мало зависит от режима намагничивания.

Размах сигнала, обусловленный дефектом наружной поверхности, для режимов намагничивания менее 256 А/см при увеличении глубины дефекта до 1 мм , сначала резко возрастает, а затем плавно увеличивается. Для режимов намагничивания более 256 А/см зависимость размаха сигнала от глубины дефекта линейна и практически не зависит от режима намагничивания. Размах сигнала, обусловленного дефектом наружной поверхности, при увеличении напряженности поля сначала круто возрастает, а при напряженности поля более 300 А/см остается практически постоянным и мало зависит от глубины дефекта. С увеличением глубины дефекта ширина сигналов, обусловленных дефектами наружной поверхности, сначала увеличивается, а затем, достигнув своего максимума, уменьшается. Кривые тем раньше достигают максимума, чем меньше глубина дефекта. Ширина сигнала, обусловленного дефектом наружной поверхности, с увеличением раскрытия несплошности монотонно увеличивается и мало зависит от режима намагничивания.

С ростом напряженности поля размах сигналов, обусловленных дефектами, расположенными на различной глубине от поверхности объекта, возрастает, достигая постоянной величины при напряженности поля тем большей, чем больше глубина залегания дефекта. Закономерности нарушаются при приближении несплошности к внутренней и наружной поверхности образца (толщина образца – 25 мм , глубина залегания дефекта $2,5$ и $22,5 \text{ мм}$).

Размах сигналов, обусловленных дефектами наружной и внутренней поверхности (при различных расстояниях между контролируемым объектом и пленкой), возрастает с увеличением напряженности намагничивающего поля, а затем стабилизируется. Чем меньше расстояние от пленки до объекта, тем при большей напряженности поля стабилизируется размах сигнала, вызванного дефектом.

Наибольшая разрешающая способность метода имеет место при контроле в приложенном поле постоянного магнита, перемещаемого над пленкой. При этом можно различить два локальных углубления, которые перекрываются. Два протяженных наружных паза шириной $0,2 \text{ мм}$ и глубиной $1,5 \text{ мм}$, пересекающихся под углом 5° , четко различаются на визуализирующей магнитные поля пленке по всей длине несплошностей. Разрешаю-

шая способность дефектов внутренней поверхности возрастает с увеличением режима намагничивания и уменьшением глубины залегания дефекта. Так, при напряженности поля более 550 А/см минимальное расстояние между двумя уверенно различаемыми протяженными дефектами внутренней поверхности составляет от 1,5 до 2 мм в образцах толщиной соответственно от 6 до 10 мм.

Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке показала, что при угле наблюдения $\pm 50^\circ$ к нормали к поверхности пленки размах сигнала, обусловленного дефектом, остается неизменным и резко падает вне этого интервала.

Полученные результаты исследований позволят в ряде случаев оценить величину дефекта по его индикаторному рисунку на визуализирующей магнитные поля пленке.

КАК ОТЛИЧИТЬ ТРЕЩИНУ ОТ РИСКА ПО ВИДУ СИГНАЛА

Новиков Вл.А., Скрябина Г.И., Кушнер А.В., Шилов А.Вл.
Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

К значительным материальным потерям и человеческим жертвам может привести выход из строя некоторых объектов в процессе их эксплуатации. Это балки несущих конструкций, винты речных и морских судов, стенки осевых каналов роторов турбин, гибы труб, лопасти летательных аппаратов, оси и опоры вагонов, буровое оборудование, литые детали и др. Такие объекты иногда покрыты слоем краски или в процессе работы подвергаются коррозии. Чтобы предотвратить преждевременное разрушение, их необходимо контролировать на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов. Применяемые для этих целей неразрушающие методы контроля не позволяют отличить наиболее опасные дефекты от других, имеют низкую производительность, требуют тщательной подготовки поверхности объекта, иногда с их помощью сложно проконтролировать труднодоступные места, детали в узлах.

Весьма перспективным для обнаружения дефектов в таких объектах является магнитографический метод контроля (МГМК), который характеризуется высокой производительностью и экономичностью, не требует предварительной зачистки поверхности контролируемого изделия, однако намагничивающие устройства для его реализации отличаются большими весом и габаритами, необходимостью изготовления дополнительных полюсных наконечников и использования мощных источников питания. Кроме того, этот метод не позволяет отличить трещины и узкие несплавления от рисок, поверхностных углублений, широких дефектов.

Предпочтительным является способ МГМК, при котором объект намагничивают перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель, уложенный на его поверхность. Он позволяет повысить мобильность метода контроля, снизить потребление электроэнергии. Однако этот способ МГМК подробно не исследован, а поэтому не нашел широкого практического применения. Его развитию посвящена настоящая работа.

Экспериментально установлено, что при магнитографическом методе контроля с намагничиванием контролируемого объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель и считывании записи с ленты дифференциальным индукционным преобразователем, трещины, сквозные и узкие несквозные несплошности обнаруживаются двуполярным электрическим импульсом, а дефекты «с дном» (риски, широкие несквозные несплошности, углубления от поверхностных неровностей) выявляются в зависимости от условий контроля однополярным, трансформированным или двуполярным сигналом. Изменение вида сигнала, обусловленного дефектом «с дном», и смена его полярности происходят при удалении магнита от поверхности объекта, увеличении его высоты, переходе от намагничивания «углом вперед» к намагничиванию «углом назад», изменении угла наклона магнита и глубины дефекта, изменении крутизны характеристики магнитной ленты.

Для постоянного магнита с коэрцитивной силой $H_c = 2400$ А/см и остаточной индукцией $B_r = 0,39$ Тл экспериментально определены условия, при которых одновременно обеспечивается наибольшая чувствительность метода контроля и селективность к виду дефекта, при этом наиболее опасные дефекты (трещины, сквозные и узкие несквозные несплошности) обнаруживаются двуполярными сигналами, а другие дефекты (риски, углубления от поверхностных неровностей, широкие несквозные несплошности) – однополярными:

– *при записи на низкокоэрцитивную ленту ($H_c = 80$ А/см) угол наклона магнита к поверхности объекта – от 0° до 5° или от 85° до 90° при намагничивании «углом назад», от 40° до 60° – «углом вперед»; если магнит обращен к объекту гранью с одним полюсом, то расстояние Δ между объектом контроля и магнитом должно быть от 0 до 0,4 мм или от 4 до 11 мм, высота L магнита от 6,5 до 13 мм или от 39 до 130 мм; *при записи на высококоэрцитивную ленту ($H_c = 260$ А/см) Δ должно быть от 0,4 до 11 мм, а L – от 39 до 130 мм в исследованном диапазоне $6,5 \leq L \leq 130$ мм;**

– если магнит обращен к объекту гранью с двумя полюсами, то Δ должно быть минимальным, средняя часть магнита на отрезке, составляющем около 70 % длины грани магнита, должна покрывать всю ширину ленты, а плоскость, разделяющая полюсы магнита, образовывать минимальный угол (но не более 20°) с направлением перемещения магнита, совпадающим с предполагаемым направлением дефекта в изделии.

Характер сигналограмм, причины смены полярности сигнала, обусловленного дефектом, и его трансформации требуют объяснения. Было высказано предположение, что однополярный вид сигнала обусловлен тангенциальной составляющей поля в зоне дефекта, вызванной действием нормальной составляющей напряженности внешнего поля, а смена его полярности – гистерезисными явлениями в магнитной ленте при действии изменяющих направление нормальной и тангенциальной составляющих поля перемещаемого магнита.

Объяснены причины смены полярности сигнала, обусловленного дефектом, при действии только тангенциальной или только нормальной составляющей напряженности внешнего магнитного поля, изменяющего направление на противоположное, что имеет место при перемещении магнита над объектом с уложенной лентой.

Методом графической аппроксимации предельного и частных циклов гистерезиса показано и экспериментально подтверждено, что вид сигнала (однополярный, двуполярный, трансформированный), обусловленного дефектом, зависит от соотношения между остаточной намагниченностью участка ленты, находившегося в зоне действия поля рассеяния дефекта, и ее остаточной намагниченностью, вызванной полем перемещаемого магнита. Это соотношение может изменяться вследствие гистерезисных явлений в магнитной ленте при изменении величины намагничивающего и (или) размагничивающего поля, величины поля рассеяния дефекта, так как на следе перемещаемого постоянного магнита направление намагничивания тангенциально, а в ряде случаев – нормально поверхности контролируемого объекта, изменяется на противоположное.

Показано, что сигнал, обусловленный дефектом при считывании записи с ленты дифференциальной магнитной головкой имеет однополярный (или трансформированный) вид, если одна часть ленты под влиянием поля рассеяния дефекта приобретает большую, вторая – равную, а третья – меньшую остаточную намагниченность $M_{гд}$, чем лента под действием внешнего поля $M_{г0}$. Если $M_{гд} > M_{г0}$ или $M_{гд} < M_{г0}$, то сигнал имеет двуполярный вид, а полярность его полуовн зависит от того, большую или меньшую остаточную намагниченность приобретают участки магнитной ленты в зоне дефекта по сравнению с ее участками, находившимися под действием внешнего поля.

Для повышения чувствительности метода за счет более точного определения и стабилизации режима намагничивания и положения рабочей точки магнитной характеристики магнитоносителя предложено изделие вместе с уложенным на его поверхность магнитоносителем намагничивать через немагнитную прокладку или воздушный зазор, величину которых выбирают с помощью разработанного устройства из условия обеспечения наибольшего отношения сигнал/шум для дефекта минимального браковочного уровня. При этом уверенно обнаруживаются несплошности глуби-

ной $h \geq 0,15$ мм, шириной 5 мкм и более, если параметр шероховатости контролируемой поверхности $Ra \leq 10$ мкм.

При установленных условиях новыми информационными параметрами сигналов, обусловленных дефектами, являются: вид сигнала, так как сигнал принимает однополярный или двуполярный вид в зависимости от наличия или отсутствия «дна» у несплошности, что позволяет повысить селективность метода; *размах* (вместо амплитуды), так как смена полярности сигнала при изменении условий контроля происходит, минуя стадию перехода через ноль его размаха, что позволяет исключить пропуск дефектов и повысить достоверность контроля элементов матрицы штампа по сравнению с традиционным методом на 24,9 %.

ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИСТАВНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕМ

Сташков А.Н., Ничипурук А.П., Огнева М.С.

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Задача оценки степени упругой и пластической деформаций в конструкциях из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей, используемых для изготовления трубопроводов, сосудов высокого давления, деталей в машиностроении, по-прежнему остается актуальной. Перспективность применения в качестве параметров контроля магнитных характеристик было, в частности, показано в работе [1]. Исследуя зависимость дифференциальной магнитной проницаемости от поля, можно получить величины критических полей смещения 90-градусных доменных границ, чувствительность которых к величине и анизотропии упругих и пластических деформаций достаточно велика. Эти критические поля получают путем сравнения расчетной кривой $\mu_d(H)$ с экспериментальной, измеренной на предельной петле магнитного гистерезиса. Расчетную кривую $\mu_d(H)$ получают из модели, предложенной ранее [2]. В качестве дополнительного параметра предлагалось использовать поле наведенной магнитной анизотропии $H_a = (|H_w| + H_{90})/2$, где H_w – среднее поле, в котором вследствие наведенной магнитной анизотропии происходит смещение 90-градусных доменных границ в диапазоне полей от $(-H_{\max})$ до нуля; H_{90} – среднее критическое поле смещения 90-градусных доменных границ при приближении к техническому насыщению. Однако, такой метод сравнения двух кривых автоматизировать затруднительно, а ручное сопоставление сопряжено с затратами времени и определенным субъективизмом при оценке параметров.

В данной работе предлагалось получать вышеперечисленные параметры экспериментальным путем. Образец был изготовлен в виде пластины из стали 09Г2. Испытания проводились на разрывной машине при комнатной температуре. К образцу последовательно прикладывались нагрузки, приводящие к упругой, а затем к пластической деформации (вплоть до разрушения образца при относительном удлинении 35 %). Измерения магнитных параметров проводили в 2-х взаимно-перпендикулярных направлениях (вдоль и поперек прикладываемой нагрузки) с помощью 2-х первичных преобразователей с ортогональной намагничивающей системой. Зависимость $\mu_d(H)$ снимали как во время нагрузки, так и после разгрузки (при пластической деформации) с помощью П-образных приставных электромагнитов с измерительными катушками, намотанными на центральные части сердечников. Скорость перемагничивания составляла 10 мГц. Эксперимент состоял из двух независимых циклов измерения. Сначала снимали кривую $\mu_d(H)$ при перемагничивании одним электромагнитом по петле гистерезиса, близкой к предельной (максимальная напряженность магнитного поля в межполюсном пространстве электромагнита составляла около 350 А/см). Из этой кривой определяли параметры H_{180} (поле максимальной дифференциальной проницаемости) и H_w (поле, при котором в разгруженном состоянии начинается перегиб на участке кривой $\mu_d(H)$ в диапазоне полей от $(-H_{\max})$ до нуля). Второй цикл измерения состоял в следующем: тем же электромагнитом намагничивали участок образца до технического насыщения, плавно выключали намагничивающий ток и вторым электромагнитом перемагничивали пластину под углом 90° к исходному намагничиванию. Из кривых, полученных при измерении двумя датчиками и применении ортогонального перемагничивания, получали параметр H_{90} (поле мак-

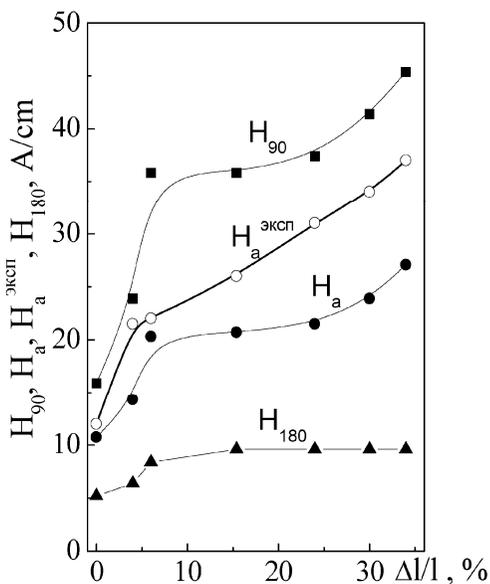


Рис. 1

снимали как во время нагрузки, так и после разгрузки (при пластической деформации) с помощью П-образных приставных электромагнитов с измерительными катушками, намотанными на центральные части сердечников. Скорость перемагничивания составляла 10 мГц. Эксперимент состоял из двух независимых циклов измерения. Сначала снимали кривую $\mu_d(H)$ при перемагничивании одним электромагнитом по петле гистерезиса, близкой к предельной (максимальная напряженность магнитного поля в межполюсном пространстве электромагнита составляла около 350 А/см). Из этой кривой определяли параметры H_{180} (поле максимальной дифференциальной проницаемости) и H_w (поле, при котором в разгруженном состоянии начинается перегиб на участке кривой $\mu_d(H)$ в диапазоне полей от $(-H_{\max})$ до нуля). Второй цикл измерения состоял в следующем: тем же электромагнитом намагничивали участок образца до технического насыщения, плавно выключали намагничивающий ток и вторым электромагнитом перемагничивали пластину под углом 90° к исходному намагничиванию. Из кривых, полученных при измерении двумя датчиками и применении ортогонального перемагничивания, получали параметр H_{90} (поле мак-

симальной дифференциальной проницаемости при перемагничивании под углом 90°).

На рисунке, в качестве примера, приведены зависимости рассчитанных по модели параметров H_{180} , H_{90} и H_a , а также для сравнения непосредственно полученной из эксперимента параметр $H_a^{\text{эксп}} = (|H_w| + H_{90})/2$ от величины относительного удлинения пластически деформированной пластины после снятия приложенной нагрузки. Можно отметить, что величины H_a и $H_a^{\text{эксп}}$ качественно ведут себя схожим образом – монотонно возрастают во всем исследованном диапазоне пластических деформаций. Напротив, величина H_{180} , пропорциональная коэрцитивной силе, практически не меняется при увеличении относительного удлинения вплоть до разрушения образца. Существенный вклад в величину $H_a^{\text{эксп}}$ вносит поле H_w , связанное с началом перегиба на кривой $\mu_d(H)$ в области полей от насыщения до остаточной индукции. В свою очередь, возникновение этого перегиба было объяснено возникновением после разгрузки вдоль направления нагружения образца остаточных напряжений сжатия.

В упругой области при действии некоторой нагрузки наблюдается, как и у коэрцитивной силы, локальный минимум параметра H_{180} , что можно связать со сменой знака магнитострикции. При этой нагрузке разница между полями H_{90} и H_{180} максимальна.

Таким образом, в работе была показана возможность экспериментального определения критических полей смещения 90° -градусных доменных границ H_{90} и полей наведенной магнитной анизотропии $H_a^{\text{эксп}}$ (при использовании разработанного первичного преобразователя с ортогональным перемагничиванием). Также показана возможность их использования в магнитной структуроскопии для контроля упругих и пластических деформаций (вплоть до разрушения) низкоуглеродистых сталей.

Литература

1. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Костин В.Н., Корх М.К. Дефектоскопия, № 9. 2009. С. 31 - 38.

2. Ничипурук А.П., Розенфельд Е.В. ФММ, Т. 84. Вып. 6. 1997. С. 72 – 78.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (номер МК-2716.2010.8) и программы Президиума РАН (проект 09-П-2-1001).

СЕКЦИЯ № 2. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции: Будадин О.Н., Абрамова Е.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОПТО-ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ухаров А.С.¹, Будадин О.Н.¹, Гринштейн М.Л.²
¹ООО «ЮНИТИ-М», Москва, Россия
²ЗАО «Институт информационных технологий»,
Республика Беларусь, Минск

Важной особенностью современных диагностических средств является необходимость, как совершенствования существующих, так и внедрение новых технологий, позволяющих получать объективную информацию о контролируемых объектах. На данный момент магистральные сети в России серьезно изношены. Сотни тысяч километров теплотрасс используются более 20 лет, хотя амортизационный срок надежной эксплуатации труб больших диаметров (500–800–1000 мм) составляет максимум 16 лет. Проблема обеспечения надежности эксплуатации теплотрасс ставят принципиально новые задачи создания методов и программно-аппаратных средств мониторинга их технического состояния.

Для решения таких задач российскими и белорусскими учеными была разработана и испытана отечественная система температурного мониторинга, основанная на физическом эффекте романовского рассеяния в стандартных кварцевых многомодовых оптических волокнах. Современные волоконно-оптические линии связи позволяют передавать широкополосные сигналы (10 ГГц и более) на расстояние в десятки километров без ретрансляторов. Эти же свойства делают оптическое волокно крайне привлекательными для использования в устройствах контроля и измерения различных физических величин, таких как температура, механические напряжения, давление и т.п. Такие устройства называют волоконно-оптическими датчиками (ВОД). В этом случае оптическое волокно (ОВ) выступает в качестве чувствительного элемента. Изменение параметров внешней среды приводит к изменению параметров сигнала, распространяющегося по ОВ. Такие датчики по своей сути являются распределенными, поскольку воздействию подвергаются различные участки ОВ (все ОВ или каждая его точка) и, тем самым, имеется возможность отслеживать изменения среды в большом количестве точек или непрерывно по всей длине волокна. В этом случае одно ОВ заменяет систему точечных датчиков (их число в некоторых случаях может составлять сотни и тысячи штук), которые должны быть установлены для решения конкретной задачи контроля.

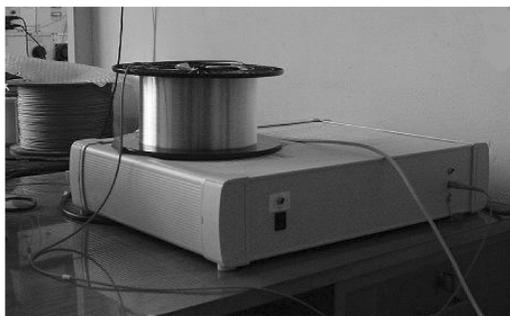


Рис. 1. ИТОВ-1

На рис. 1 приведена фотография аппаратного комплекса системы. В состав оборудования входят: электронный блок и волоконно-оптический кабель (на рисунке он намотан на катушку), который является в системе распределенным датчиком температуры.

Принцип работы системы основан на рефлектометрическом методе измерения обратного рассеянного стимулированного рamanовского излучения. Возникновение рamanовского стимулированного сигнала связано с взаимодействием падающего излучения и вибрирующей, вследствие температурного нагрева, кристаллической решетки среды распространения излучения (оптического волокна). Интенсивность отраженного оптического сигнала зависит от температуры. Таким образом, измеряя интенсивность отраженного сигнала и, зная, коэффициент зависимости интенсивности от температуры, можно определить температуру источника теплового возбуждения. Измеряя рефлектометром сигнал обратного рассеяния легко определить температуру вдоль оптического волокна и, соответственно, определять местоположение источника вдоль волокна.

Измерение температуры ОВ осуществляется путем регистрации рamanовского рассеяния. Спектр рассеяния в этих случаях состоит из двух компонент: стоксовой и антистоксовой (их длины волн соответственно больше и меньше длины волны падающего излучения).

При рamanовском рассеянии изменение температуры ОВ приводит к изменению интенсивности (мощности) антистоксовой компоненты. При этом температура не влияет на характеристики стоксовой компоненты и рэлеевского рассеяния. Отношение интенсивностей компонент рamanовского рассеяния определяется из выражения:

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \frac{\lambda_S^4}{\lambda_{AS}^4} \cdot \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right), \quad (1)$$

где I_{AS} и I_S – интенсивности антистоксовой и стоксовой компонент соответственно; λ_{AS} и λ_S – длины волн этих компонент; h – постоянная Планка;

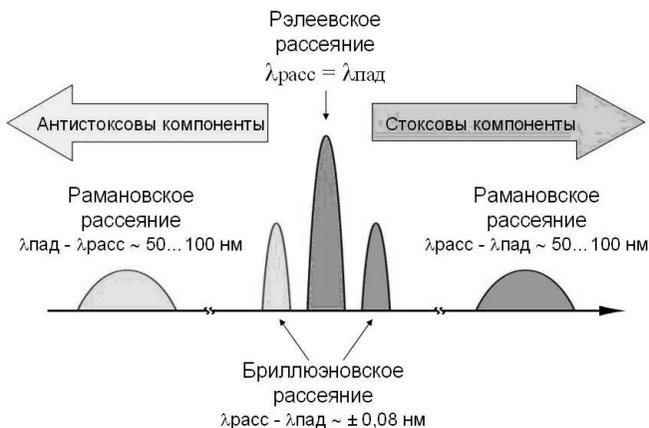


Рис. 2. Спектр рассеяния в ОВ

c – скорость света в вакууме; T – абсолютная температура; ν – величина частотного сдвига между падающим излучением и рамановскими линиями.

Из соотношения (1) следует, что для измерения температуры ОВ достаточно знать отношение интенсивностей I_{AS}/I_S . При этом расстояние по оси длин волн между компонентами довольно велико. Это позволяет:

- использовать для регистрации рамановского рассеяния такие же методы и устройства, как и в обычной рэлеевской рефлектометрии;
- применять стандартные телекоммуникационные оптические мультиплексоры и фильтры для разделения спектральных компонент рассеяния;
- измерять температуру как одномодовых, так и многомодовых ОВ.

Однако интенсивность антистоксовой компоненты сигнала обратного рассеяния будет зависеть не только от температуры ОВ, но и от затухания в нем. Поэтому аппаратура и методы (методики) измерения должны учитывать этот фактор.



Рис. 3. Прокладка опто-волоконного кабеля по трубопроводу

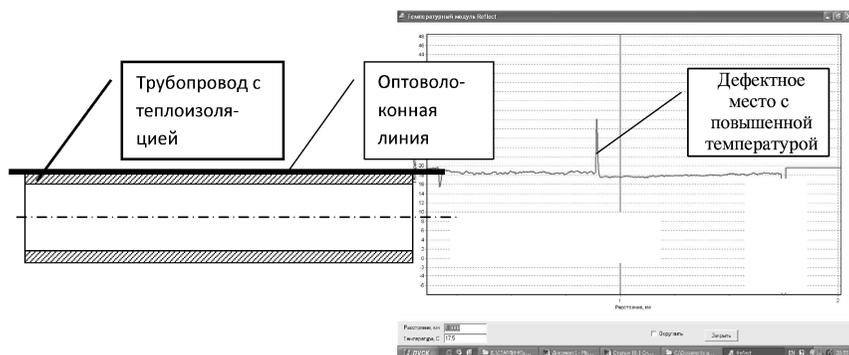


Рис. 4. Значение температуры по длине трубопроводов

Сам волоконно-оптический кабель прокладывается по теплотрассе, анализ температуры которой представляет интерес (рис. 3, 4).

Технические характеристики

Параметр сравнения	Предлагаемая система
Длина кабеля-сенсора	Не менее 15 км
Абсолютная погрешность измерения температуры	Не хуже ± 1 °С,
Чувствительность измерения температуры	Не хуже $\pm 0,5$ °С
Абсолютная погрешность измерения координаты по длине	Не хуже ± 3 м
Время измерений	1...12 мин
Преимущественная ориентация комплекса оборудования	Контроль и измерение температуры любых протяженных объектов
Возможность архивирования результатов, ретроспективный анализ	Предусмотрено
Сертификация	Сертификация системы предусмотрена
Квалификация обслуживающего персонала	Требуется специалист со среднетехническим или высшим техническим образованием
Рефлектометр	Многомодовый и одномодовый
Цена	Ориентировочно, 2,0...2,5 млн. руб
Срок эксплуатации (расчетный)	Не менее 10 лет

Распределенные ВОД могут успешно применяться для определения утечки в трубопроводах. Задача контроля температуры может быть осуществлена путем измерения температуры оптического волокна, проложенного вдоль теплопровода.

Список литературы

1. **Волоконно-оптические датчики.** Вводный курс для инженеров и научных работников: Пер.с англ./ Под. ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
2. **Листвин А.В., Листвин В.Н.** Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с..

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Пудовкина Е.В., Антонов А.О., Майникова Н.Ф., Рогов И.В.
*Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия*

Одним из основных показателей уровня развития промышленности является качество выпускаемых металлополимерных изделий, а именно, совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. В это понятие входят самые различные параметры, которые необходимо контролировать. Это и прочностные, теплофизические свойства, наличие включений, отслоений и других дефектов, геометрические параметры, например, толщина защитного покрытия. Важную роль в решении задачи обеспечения выпуска качественной продукции играют методы и средства контроля качества.

Цель работы состоит в разработке измерительной системы для неразрушающего теплового контроля толщины защитных полимерных покрытий металлических изделий.

Были решены следующие задачи: выбрана измерительная схема метода теплового НК с круглым плоским источником тепла постоянной мощности; сформулирована и решена краевая задача теплопроводности, применительно к двухслойной системе: полимерное покрытие – металл; исследована математическая модель метода, позволяющая определять толщину слоя полимерного покрытия по температурным откликам на тепловое воздействие от источника тепла, действующего на поверхности двухслойного тела; разработана методика и определены оптимальные условия НК двухслойных материалов; разработана и реализована в аппаратном исполнении измерительная система НК.

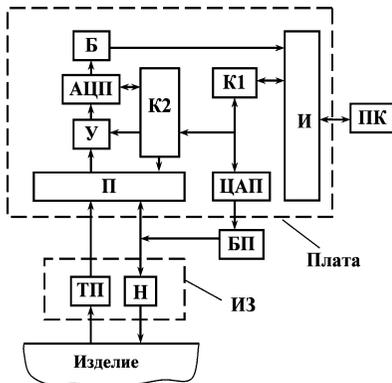


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы

на исследуемое изделие с помощью нагревателя (Н), температура в заданной точке контроля фиксируется термоэлектрическим преобразователем (ТП). В качестве ТП используются дифференциальная термопара, горячий спай которой устанавливается в плоскости контакта ИЗ с исследуемым объектом, холодный спай устанавливаем на подложку ИЗ. Мощность и длительность теплового воздействия встроенного в подложку ИЗ нагревателя Н задаются программно через интерфейс (И), контроллер К1, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и блок питания (БП).

Сигналы с ТП и блока питания поступают через мультиплексор (П), усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), буфер обмена (Б) и интерфейс (И) в ПК. Сбор информации производится при нагреве исследуемого тела. ИС реализует алгоритмы управления режимами эксперимента, определения толщины защитных покрытий.

Метод определения толщины покрытий основан на модели, представленной на рис. 2. Тепловое воздействие на исследуемое тело с равномерным начальным температурным распределением осуществляется с помощью нагревателя постоянной мощности, выполненного в виде тонкого диска радиусом R , встроенного в подложку ИЗ. Подложка ИЗ изготовлена из хорошего теплоизолятора с ТФС: температуропроводностью a_3 , теплопроводностью λ_3 , теплоемкостью c_3 , плотностью ρ_3 . Исследуемое тело представляет собой конструкцию, состоящую из двух слоев: первый – низкотеплопроводный с ТФС: температуропроводностью a_1 , теплопроводностью λ_1 , теплоемкостью c_1 , плотностью ρ_1 ; второй – высокотеплопроводный с теплофизическими свойствами: температуропроводностью a_2 , теплопроводностью λ_2 , теплоемкостью c_2 , плотностью ρ_2 . Размеры по длине и ширине исследуемого тела: L_1 и L_2 . Толщина первого слоя – h_1 , второго – h_2 . Температура в точке контроля измеряется с помощью ТП.

В случае НК объектов активными тепловыми методами теплофизические свойства (ТФС) проявляются через температурный отклик исследуемого образца на тепловое воздействие, которому подвергается образец (или изделие) в специально организованном эксперименте [1].

Структурная схема измерительной системы (ИС) представлена на рис. 1.

ИС состоит из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы, измерительного зонда (ИЗ), регулируемого блока питания (БП). Зонд обеспечивает создание теплового воздействия

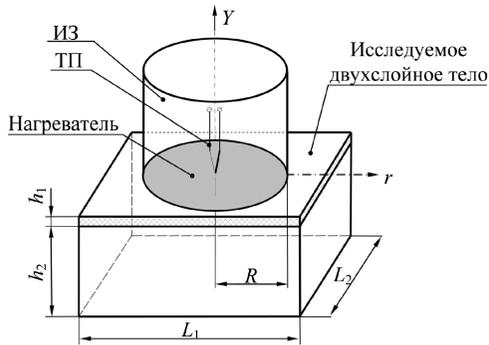


Рис. 2. Измерительная схема

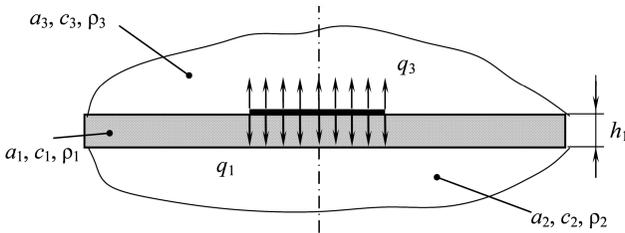


Рис. 3. Тепловая схема

Математическая модель теплопереноса от плоского круглого источника тепла постоянной мощности для данного двухслойной системы получена в результате решения краевой задачи теплопроводности:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1}, \quad (1)$$

где выражение (1) представляет собой линейную зависимость вида:

$$T(0, \tau) = b_1 \sqrt{\tau} + b_0, \quad (2)$$

где $b_1 = \frac{2q}{\sqrt{\pi}\varepsilon_2}$, ε_1 и ε_2 – значения тепловой активности материалов покрытия и металлической подложки.

Объект исследования – двухслойное тело, первый слой которого низкотеплопроводный, а второй – высокотеплопроводный, т.е. $\lambda_1 \ll \lambda_2$, тогда $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$.

Следовательно,

$$b_0 = \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \cdot \frac{q \cdot h_1}{\lambda_1} \approx \frac{q \cdot h_1}{\lambda_1}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что

$$h_1 = \frac{\lambda_1 \cdot b_0}{q}. \quad (4)$$

Из выражения (4) можно определить толщину первого слоя h_1 . Если известна толщина покрытия h_1 , то можно определить ТФС или выявить наличие дефекта покрытия по температурному отклику.

Литература

1. **Жуков Н.П.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова // Монография. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ЭНЕРГОАУДИТЕ

Абрамова Е.В., Будадин О.Н., Быстрова Н.А., Галкин Д.И.

*ФГУ НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э.Баумана,
Москва, Россия*

Доклад посвящен анализу вопросов проведения инструментального энергоаудита с использованием технологий теплового контроля.

В настоящее время во всем мире уделяется значительное внимание рачительному использованию топливно-энергетических запасов планеты, происходит переход к новым технологиям производства энергии и созданию конструкций с повышенными параметрами энергоэффективности.

На сегодняшний день энергосбережение входит в пять стратегических направлений приоритетного технологического развития России. Планируется сократить энергоемкость отечественной экономики на 40 % к 2020 году и при этом сэкономить около 10 триллионов руб. Это подтверждается законодательными актами, в т.ч. положениями «Энергетической стратегии России на период до 2020 года», Федеральным законом Россий-

ской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».

Реализация задач, поставленных законом, сводится к созданию в нашей стране развитой системы проведения энергетического аудита объектов, использующих топливно-энергетические ресурсы, и выдаче рекомендаций о способах их экономии.

Строго говоря, качество диагностики определяется тремя основными составляющими: наличием современной приборно-аппаратной базы, корректных технологий контроля, обеспечивающих получение информационного параметра, по которому судят о качестве объекта с заданной точностью, и квалифицированного персонала, эти работы выполняющего. При этом отсутствие квалифицированного персонала не позволит использовать преимуществ современных приборов, технологий контроля, расчетных методов оценки качества и энергоэффективности объектов. Таким образом, понятие «квалифицированного персонала» является ключевым при выполнении работ по энергетическому аудиту объектов промышленности и ЖКХ.

В соответствии с требованиями № 261-ФЗ ряду Российских центров даны полномочия по обучению энергоаудиторов. Не смотря на то, что программа обучения для всех центров одинакова, не всегда оно проводится на высоком техническом и практическом уровнях, так как квалифицированных специалистов в области обучения не хватает, также. Программы обучения в основном построены на расчетных методах, но без инструментального аудита провести корректную диагностику невозможно. При этом экспериментальная часть ограничивается перечислением прибором, необходимых для проведения анализа, а технологиям контроля внимания практически не уделяется.

Современные технологии диагностики технического состояния, энергоэффективности оборудования, конструкций, зданий и сооружений основаны на применении неразрушающего контроля в условиях их эксплуатации.

Тепловой контроль (ТК) в настоящее время является одним из немногих методов, позволяющих проводить диагностику при эксплуатационных нагрузках, он экологически безопасен, дает наглядные результаты и поэтому позволяет решать большое количество поставленных практикой задач в области технического диагностирования и оценки энергоэффективности объектов. Более того, ТК является основным инструментальным методом оценки текущего состояния объекта и на базе его результатов возможны рекомендации о прогностике теплотехнических характеристик объектов. Однако, эти рекомендации могут корректно сделать только специалисты в тепловом контроле.

Несмотря на все расширяющийся объем применения теплового контроля, увеличивающийся парк приборов, проблемы повышения его качест-

ва ставятся все более остро. До настоящего времени существует только 1 ГОСТ 1985 г. выпуска на проведение тепловизионного контроля и несколько отраслевых методик выпуска начала 2000-х годов. Что касается технологий проведения энергоаудита – разработка и реализация их отдана в саморегулируемые организации (СРО). Но большинство из них не имеет в своем штате специалистов высшей квалификации по тепловому контролю, которые могут разрабатывать методики контроля, поэтому существует некоторый технологический «вакуум» в области энергетических обследований объектов.

Необходим новый подход к решению задач проведения энергоаудита, как технологической части, так и обучению и оценке квалификации специалистов.

ФГУ НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, понимая эти проблемы, предлагает специалистам не только курс обучения энергоаудиту, но и в дополнение к нему подготовку и сертификацию специалистов в области методов неразрушающего контроля, применяемых при экспериментальном анализе объектов, в т.ч. по тепловому контролю.

В процессе обучения проводится анализ нормативно-правовых актов в области энергосбережения, повышения энергоэффективности, рассматриваются процедуры проведения энергетических обследований, порядок составления энергетического паспорта, разбор методов расчета потерь и запасов энергоносителей. Особое внимание уделяется технологии проведения инструментального обследования в рамках проведения работ по энергоаудиту.

Выпущены и готовятся к печати методические пособия, предоставляется возможность приобретения методик контроля, аттестованных Росстандартом.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Попов О.Н., Бардадымова О.Н., Жуков Н.П., Майникова Н.Ф.

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Россия*

Доклад посвящен вопросам неразрушающего контроля теплофизических свойств (ТФС) твердых неметаллических материалов. Сложность и большой объем экспериментальных исследований по определению качества, долговечности и надежности изделий, как из традиционных, так и вновь синтезируемых материалов, требуют создания новых эффективных методов и средств контроля. Среди них особое место занимают тепловые методы

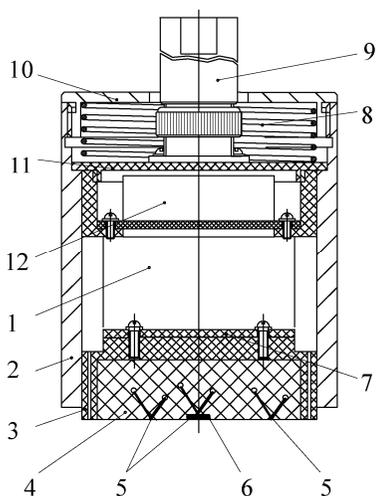


Рис. 2. Схема измерительного зонда с линейным нагревателем

свою очередь, состоит из основания 3, разъема 9. С контактной стороны измерительной ячейки на поверхности теплоизолятора 4 размещены микротермопары 5, сваренные встык. Линейный нихромовый нагреватель 6 изготовлен в виде узкой полосы. Выводы термопар и нагревателя проходят через специальные отверстия. В качестве микротермопар 5 используются дифференциальные термопары, горячие спаи которых устанавливаются в плоскости контакта ИЗ с исследуемым объектом. Холодные спаи микротермопар установлены на подложку ИЗ. На крышке 11 измерительной ячейки расположен разъем 9, предназначенный для коммутации сенсора со встраиваемой в него платой РСІ-1202Н. Между измерительной ячейкой и крышкой 10 корпуса расположена пружина 8, которая обеспечивает одинаковое усилие прижима измерительной ячейки к поверхности исследуемого материала, что обуславливает равенство контактных тепловых сопротивлений при каждом измерении.

С целью проверки работоспособности ИС проводили измерения на образцах из полиметилметакрилата (ПММА) и полиуретана марки «Рипор» с известными ТФС, а также на образцах из политетрафторэтилена (ПТФЭ) и полиамида (Капролон-В), теплопроводность (λ) которых определялась на теплофизическом приборе ИТ-3 стационарным методом (см. таблицу). Испытания показали согласованность полученных значений тепло- и температуропроводности (a) с известными и определенными стационарным методом.

усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), буфер обмена (Б) и интерфейс в ПК. Контроллер К2 обеспечивает необходимый порядок опроса каналов и различные диапазоны измерения на каждом из них. Сбор информации производится при нагреве и остывании исследуемого тела. В качестве ПК в ИС используется IBM-совместимый компьютер. Программное обеспечение ИС включает системное (СПО), прикладное (ППО) и вспомогательное (ВПО) обеспечения.

На рис. 2, в качестве примера, представлена конструкция ИЗ с линейным нагревателем.

Зонд состоит из двух основных узлов: измерительной ячейки 1 и корпуса 2. Измерительная ячейка, в

Результаты определения ТФС различных материалов

Материал	Теплофизические свойства				
	по разработанному способу		измеренные стационарным способом	справочные данные	
	λ , Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^7$, м ² /с	$\lambda_{ит-з}$, Вт/м·К	$\lambda_{спр}$, Вт/м·К	$\alpha_{спр} \cdot 10^7$, м ² /с
ПММА	0,194	1,05	–	0,195	1,02
Рипор	0,027	4,45	–	0,028	4,61
ПТФЭ	0,300	0,47	0,29	–	–
Капролон-В	0,420	0,71	0,36	–	–

Детальное описание метода, реализуемого ИС, представлено в работах [1, 2].

Список литературы

1. **Патент 2161301 РФ, G 01 N 25/18.** Способ неразрушающего определения теплофизических свойств материалов / Жуков Н.П., Муромцев Ю.Л., Майникова Н.Ф., Рогов И.В., Балашов А.А. № 99104568, заявл. 03.03.1999; опубл. 27.12.2000. Бюл № 36.
2. **Жуков Н.П.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова // Монография. – М.: Машиностроение–1, 2004. 288 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ МИКРОМЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.

*Уфимский государственный авиационный
технический университет, Уфа, Россия*

Доклад посвящен вопросам неразрушающего технического диагностирования элементов конструкций на основе метода теплового контроля, как оперативного, неразрушающего, который значительно снизит объемы контроля и позволит в реальном времени определять техническое состояние пространственно сложных металлических конструкций. Применение теплового метода контроля основано на том, что при нагружении металлоконструкций в местах концентрации напряжений происходит пластическая деформация, сопровождающаяся выделением тепла. Контроль осуществляется путем анализа температурного поля поверхности конструкции в рабо-

чих условиях при эксплуатации объекта. Получаемые температурные поля позволяют судить о локальной деформации и разрушении металла, процессе накопления дефектов и образовании макротрещины. Для анализа и физической интерпретации температурного поля необходимо знать тепловыделение от элементарных микромеханизмов, обеспечивающих пластическую деформацию и разрушение материалов. В настоящее время развиваются два подхода к проблеме источников тепла при пластической деформации. Механический подход, когда мощность тепловыделения определяется с помощью работы пластической деформации. С помощью теории пластичности строится замкнутая система уравнений, описывающая деформацию тела и включающая уравнение теплопроводности. Как правило, решение этой системы возможно только на ЭВМ. На микроскопическом уровне пластическая деформация связана с зарождением и движением различных дефектов: точечных, дислокаций, микротрещин и других. В обычных условиях для любых кристаллических материалов основной вклад в деформацию дает дислокационное скольжение. Движущиеся дислокации являются элементарными источниками тепловыделения. Рассмотрена постановка микроскопической, дислокационной задачи описания температурного поля пластической деформации и разрушения металла. Уругопластическая деформация среды описывается связными уравнениями нелинейной конечной термоупругости и уравнениями кинетики дислокаций. Система включает уравнения: движения среды, состояния (закон Гука), совместности, сплошности, кинетики дислокаций и теплопроводности. Помимо этих уравнений, должны быть еще заданы граничные и начальные условия. Получены выражения для температурных полей от одной дислокации. Повышение температуры от одной дислокации будет $\leq 10^{-3}$ К. Получены выражения для температуры вокруг линии скольжения и источника дислокаций на основе принципа суперпозиции. Таким образом, при заданном распределении плотности и скорости дислокаций можно вычислить разогрев при пластической деформации простым интегрированием температурных полей от каждой дислокации. Рассмотрен разогрев вершины тонкой трещины при зарождении дислокационной полосы скольжения (затупление вершины трещины). Получено выражение в квазистационарном случае для температуры в вершине трещины. Проведено моделирование температурных полей вокруг полосы скольжения и трещины при различных видах дислокационного скольжения, плотности дислокаций, формы трещины и режима нагружения. Таким образом, дислокации, зарождающиеся и двигающиеся, представляют собой локальные источники тепла, в которых происходит непрерывная диссипация энергии. В полосах скольжения, в вершине трещины может возникать макроскопический локальный разогрев материала выше 1К, который может быть измерен современными средствами теплового контроля.

РАЗВИТИЕ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО МЕТОДА НК

Ковалев А.В., Матвеев В.И.

ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

Тепловой неразрушающий контроль является одним из распространенных методов, применяемым в различных областях промышленности и, в частности, при контроле строительных материалов и конструкций, объектов электроэнергетики, в нефтегазовой и атомной промышленности, при решении задач оперативного контроля авиационных материалов и конструкций.

Основными средствами дистанционной регистрации и измерения температуры являются пирометры и тепловизоры. В настоящее время температурная чувствительность тепловизоров составляет в среднем $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а точность измерения температуры не выше $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При контроле авиационных материалов и композитных конструкций наиболее эффективно используется активный метод, когда для повышения теплового контраста между нормальными и дефектными зонами производят дополнительный подогрев исследуемых участков деталей и конструкций. Тепловую стимуляцию осуществляют с помощью какого-либо внешнего источника тепла, но чаще всего путем подогрева с применением оптических нагревателей или устройств, создающих тепловой поток. Импульсный вариант подогрева в некоторых случаях обеспечивает максимальный температурный контраст в определенном временном интервале.

В докладе рассматривается комбинированный вариант тепловой стимуляции температурного контраста путем непродолжительного непрерывного подогрева зоны контроля с дополнительной последующей стимуляцией импульсным источником (вспышкой). Исследования показывают, что в ряде случаев при непрерывном подогреве вслед за появлением тепловизи-

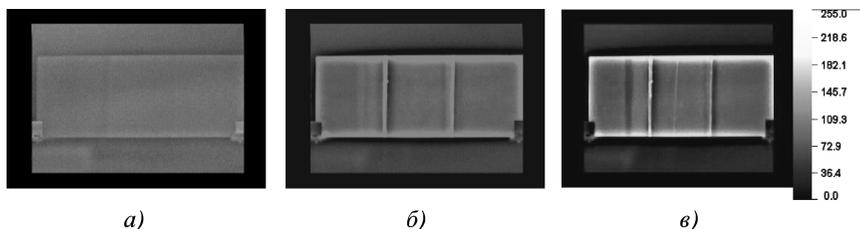


Рис. 1. Тепловизионные изображения образца углепластика, со стороны покрытия, дефектов и ступенек:

а – пассивное; *б* – после воздушного нагрева термопистолетом в течение 8–10 с;
в – после дополнительного импульсного подогрева

онного изображения дефектной зоны начинается ухудшение его контраста из-за перегрева передней поверхности объекта, что искажает информацию о внутренних неоднородностях структуры. С другой стороны, для выявления слабоконтрастных дефектов, особенно в материалах с большой теплопроводностью, более эффективен импульсный нагрев со скоростной регистрацией тепловизионных изображений. Поэтому применение комбинированного нагрева способно улучшить качество теплового контроля: непродолжительный непрерывный нагрев приводит к более контрастному на его фоне импульсному тепловизионному изображению, рис. 1.

Далее, на ряде примеров анализируется методика теплового дефектоскопического контроля с использованием комбинированного нагрева и обсуждается эффективность различных типов непрерывных и импульсных источников нагрева.

Литература

1. **Nondestructive Testing HANDBOOK**, v.3, Infrared and Thermal.
2. **Testing, Xavier P.V.** Maldaque. American Society for NDT, 2001. 718 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО АНАЛИЗУ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Будадин О.Н., Хузин Р.К.

*ОАО «ЦНИИ специального машиностроения»
Хотьково, Московской области, Россия*

При механическом нагружении в местах концентрации напряжений может происходить пластическая деформация, сопровождающаяся выделением тепла [1–6]. В случае сложных композитных конструкциях при их нагружении возникают микроразрушения в элементах структуры, вызывающие выделение энергии. Кроме того, в случае дефектов типов нарушений сплошности, например, трещиноподобных дефектов, когда напряжение сингулярно возрастает при приближении к вершине дефекта, область пластической деформации существует даже при сколь угодно малых напряжениях в толще конструкции [6].

Распространение тепла в конструкции приводит к тому, что на ее поверхности возникает сложное распределение температурного поля [7]. Зафиксировав это распределение и выделив его на фоне структурной неодн-



Рис. 1. Фотография образца из ПКМ

родности и помех можно определить местоположение проекции концентратора напряжения на поверхность контроля, а решив обратную задачу нестационарной теплопроводности [8], можно восстановить распределение источников тепла, а, следовательно, и определить геометрические координаты внутреннего положения и размер дефекта. Этот подход быть положен в основу методики диагностики технического состояния конструкций из ПКМ тепловым методом.

Решена задача моделирования температурного поля в изделии с концентратором напряжения, образовавшегося на дефекте в виде трещины при механическом нагружении контролируемого изделия. Выведены соотношения между режимами механического нагружения и количеством выделяемого тепла в области концентратора напряжения, что позволяет:

- определять оптимальные режимы механического нагружения с точки зрения максимальной выявляемости внутренних концентраторов напряжения;
- оценивать возможность обнаружения областей концентраторов напряжений и дефектов по анализу температурных полей;
- определять оптимальный состав программно-аппаратных средств для проведения контроля.

На основании проведенного моделирования разработана методика теплового контроля концентраторов напряжения в изделии, образовавшегося на дефекте типа нарушения сплошности (трещины).

Показано, что изменение температурного поля в области дефекта может быть достоверно зарегистрировано существующей тепловизионной техникой, в т.ч. получено соотношение, связывающее пространственную разрешающую способность теплового контроля со скоростью нагружения исследуемого объекта, и, наконец, описан метод определения истинного размера области концентрации напряжений, исходя из размера нагретой области.

Экспериментальные исследования проведены на образцах из ПКМ (рис. 1).

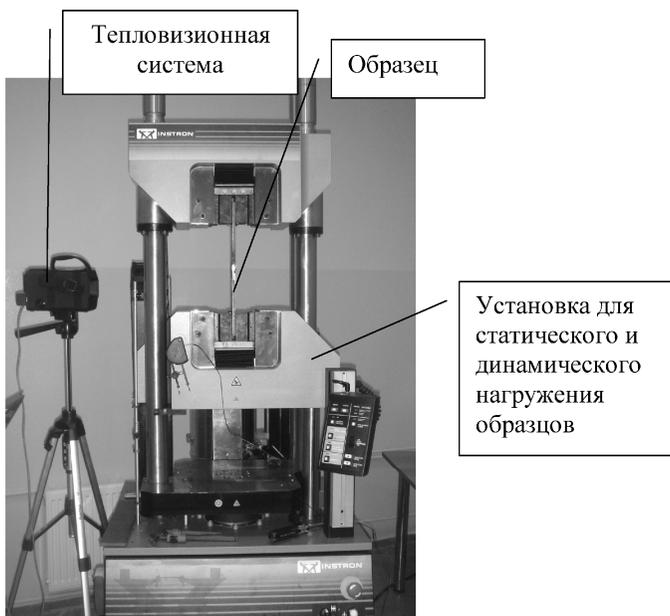


Рис. 2. Фотография проведения эксперимента

На рис. 2 приведена фотография экспериментальной установки для исследования теплового поля образцов из ПКМ при их циклическом нагружении.

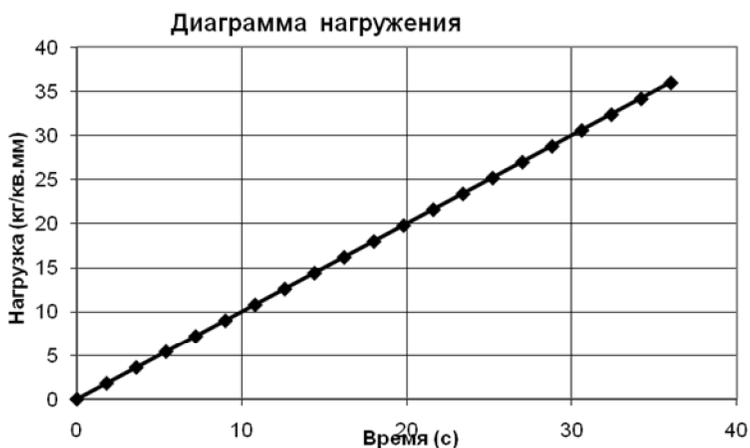


Рис. 3. График нагружения образца

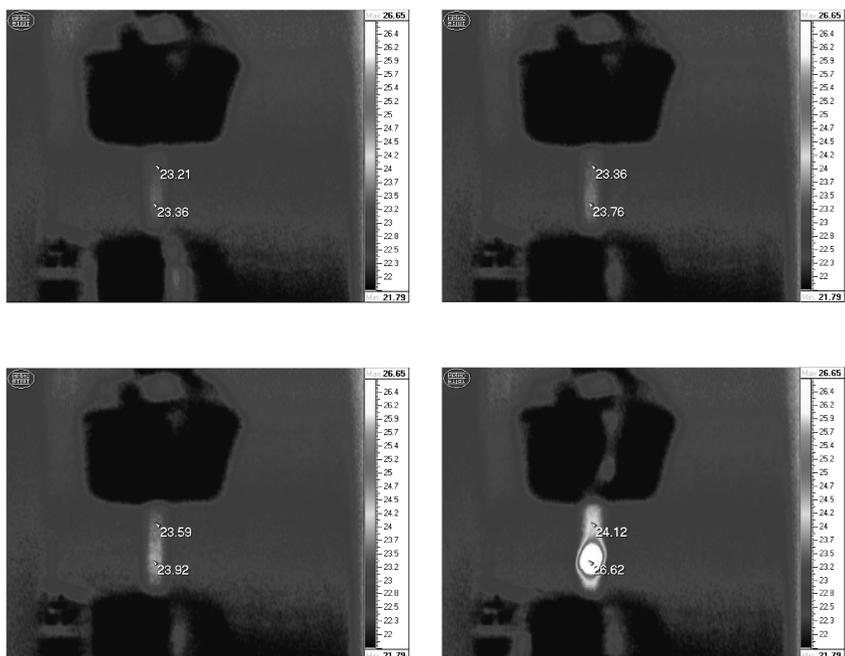


Рис. 4 (а-е)

На рис. 4 (а-г) представлена последовательность термограмм поверхности образца в процессе его нагружения.

Из рис. 4 видно, что в соответствии с теорией с увеличением величины нагружения величина температурной аномалии, в области внутреннего концентратора напряжения возрастает.

На рис. 5, 6 приведены некоторые результаты обработки экспериментальных данных.



Рис. 5

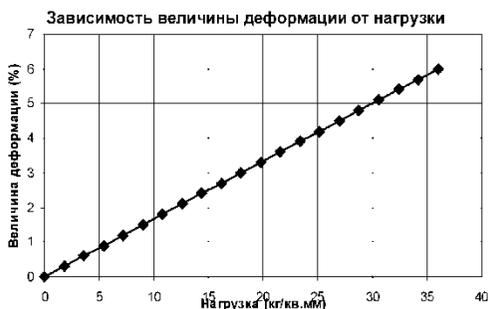


Рис. 6

Проведенные исследования показали, что тепловым методом возможно определять местонахождение внутренних концентраторов напряжения в конструкциях из ПКМ и прогнозировать предельную величину нагружения либо количество циклов нагружения не доводя изделия до разрушения. Это дает возможность прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации конструкций из ПКМ в процессе их реальной эксплуатации.

Авторы выражают большую благодарность инженеру Гульбису М.А. за большую работу по проведению экспериментов.

Литература

1. **Rittel D.** Thermomechanical aspects of dynamic crack initiation, International Journal of Fracture 99, pp. 201 - 212 (1999).
2. **Dunaev I.M. and Dunaev V.I.** Thermomechanics of brittle fracture, International Journal of Fracture 128, pp. 81 - 93 (2004).
3. **Matvienko Y.G.** Local fracture criterion to describe failure assessment diagrams for a body with a crack/notch, International Journal of Fracture 124, pp. 107-112 (2003).
4. **Rittel D.** An investigation of the heat generated during cyclic loading of two glassy polymers. Part I: Experimental, Mechanics of Materials 32, pp. 131 – 147 (2000).
5. **Rittel D., Rabin Y.** An investigation of the heat generated during cyclic loading of two glassy polymers. Part II: Thermal analysis, Mechanics of Materials 32, pp. 149–159 (2000).
6. Матвиенко Ю.Г. «Модели и критерии механики разрушения». М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
7. **Rabin Y. and Rittel D.** Infrared Temperature Sensing of Mechanically Loaded Specimens: Thermal Analysis, Experimental Mechanics, 40, pp.1 – 6 (200).

8. **Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В.** Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М., Наука, 2002. 472 с.
9. **Rittel D.** Experimental investigation of transient thermoplastic effects in dynamic fracture, *International Journal of Solids and Structures*, **37** (2000).
10. Bougaut O., Rittel D. On crack-tip cooling during dynamic crack initiation, *International Journal of Solids and Structures*, **38**, pp 2517-2532 (2001).
11. **Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С.** «Теплопередача». М.: Энергия, 1969.
12. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** «Уравнения математической физики». – М.: Наука, 1972.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

Евсеев Л.Д., Троицкий-Марков Т.Е.
¹САМГТУ Самара, Россия
²«ВЕМО», Москва, Россия

С началом развития космической разведки – 60-ые годы прошлого века – фотография земной поверхности производилась в белом свете. И только когда потенциальный противник стал прятать свои сложные технические устройства от космического ока и с развитием инфракрасной техники, в середине 70-х годов прошлого века стало возможным фотографировать такие объекты. Однако, вместе со сложными техническими устройствами (в основном военной техники) в поле зрения аппаратов попадали жилые и производственные дома. И если все дома в Зап. Европе, США Канаде и др. странах имели хорошую теплоизоляцию и наружный тепловой поток был мал, то города Советского Союза очень «светились». Как в дальнейшем оказалось до 70 % тепловой энергии из каждого здания и до 40 % из трубопроводов уходили в атмосферу. Таким образом, от сжигания 10 вагонов углы для отопления зданий 7 (семь) вагонов угля «отапливали небо». К сожалению, реальную картину экономического «эффекта» знала узкая группа людей, связанная обязательствами не разглашать государственную тайну.

И только во время «перестройки» вышеуказанные данные стали достоянием высших руководителей Министерства строительства СССР. Последовало задание научно-исследовательскому институту строительной физики разработать изменения № 3 к СНиПу Строительная теплотехника 1979 г. Одновременно шла работа над разработкой Федерального закона «Об энергосбережении». Федеральный закон № 28 от 3 апреля 1996 г. и изменения к СНиПу были разработаны и введены в действия. С 1997–98 гг. в России благодаря указанным нормативным документам стали приме-

няться технологии теплоизоляции зданий. В законе и СНиПе декларативно указывалось, что на первом этапе теплоизоляционных работ (до 2000 г.) эффект от энергосбережения должен достигнуть 20 %, а в дальнейшем после 2000 г. – 40 %. В первые годы, вдохновившись прекрасной идеей, организации и предприятия взялись за исполнение Федерального закона. Однако, в дальнейшем энтузиазм затих, так как не видно было реального положительного эффекта. Этого эффекта и не могло быть, так как ни Федеральный закон, ни СНиП не требовал контроля теплоизоляционных работ. Не трудно догадаться какого качества работы по теплоизоляции зданий выполнялись. Многие жители страны на себе это ощущают и будут ощущать. Хотя многие специалисты еще в 90-х годах предлагали методы контроля с использованием тепловизоров (например, Л. Евсеев «Теплотехнический контроль качества ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритных тепловизоров», Строй-инфо, № 3, 1996 г.) и введения данного контроля в норматив по энергосбережению (см. ТСН 23-349–2003, Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий) строители вместе с чиновниками все делали для того, чтобы неразрушающий контроль теплоизоляции зданий и сооружений не внедрялся. Множество статей и выступлений (конференции, «круглые столы» и в СМИ) не сдвинули в течение десятилетия этот вопрос. И только при разработке нового федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.09 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» нам удалось добиться вписать в закон об обязательном контроле теплоизоляционных работ методами технической диагностики. Закон требует, чтобы все дома, построенные с 1 января 2010 г. проверялись на потерю тепловой энергии методами неразрушающего контроля и технической диагностики. Введение в действие закона и соответствующей программы Правительства РФ показывает, что мы расточительны не по карману: наши дома, теплотрассы, производственные помещения в самом прямом смысле обогревают атмосферу. Если в США температура на один квадратный метр жилья составляют в среднем 30 Гкал, а в Германии – от 40 до 6+0, то в России – около 600. Энергорасточительность обходится России в 84–112 миллиардов долларов в год, которые она не получает в виде доходов от экспорта нефти и газа. В то же время наша страна может сберечь 45 % потребления первичной энергии. Эти цифры из нового доклада Всемирного банка «Энергоэффективность в России: скрытый резерв» говорят сами за себя.

В соответствии с данными Международного энергетического агентства имеем следующие показатели энергоемкости ВВП по странам (в %, 2006 г.):

Мир – 3,7	Канада – 3,6	Россия – 23,3
США – 2,6	Польша – 3,9	Украина – 24,3
Бразилия – 2,6	Казахстан – 6,2	

Неконкурентность нашей продукции видна невооруженным глазом. Введение требований неразрушающего контроля – большое достижение, так как конечное качество тепловой изоляции зданий до настоящего времени не контролировалось.

Энергоаудит и энергосбережение прочно входят в нашу жизнь. По данным экспертов Всемирного банка, энергоэффективность в 3 раза дешевле наращивания производства энергоресурсов. Однако, сегодня Россия ежегодно предоставляет своей экономике самую крупную энергетическую субсидию в 40 миллиардов долларов, тогда вероятная ежегодная экономия средств может составлять 3–5 млрд. долларов.

Уверены, что широкое использование методов неразрушающего контроля и технической диагностики позволят нам решить вопросы энерговооружения страны.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ТЕПЛОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Онопко Н.В.¹, Чумаков А.Г.²,

¹ООО «ЮНИТИ-М», Москва, Россия

²ФГУП ММПП «Салют», Москва, Россия

Одной из задач теплового контроля является идентификация вида дефектов и оценка порога принятия решения о допуске изделия в эксплуатацию. При этом решение задачи оценки надежности по результатам неразрушающего контроля не реализовано для лопаток турбин при достаточно высоком уровне доверительной вероятности.

Лопатки турбин являются одними из наиболее сложных и ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД). Они работают в условиях высоких температур и нагрузок. От надежности лопаток турбин во многом зависят ресурс и экономичность ГТД в эксплуатации. В свою очередь надежность лопаток определяется качеством их изготовления и контроля.

Существующие методы контроля производства и эксплуатации лопаток турбин высокого давления (ТВД) – метод вихревых токов, рентгеновский метод и др., дают лишь косвенную информацию об особенностях тепловых режимов работы лопаток и не позволяют делать вывод об эффективности системы их охлаждения. Тепловой метод контроля позволяет непосредственно оценивать как качество охлаждения лопаток, так и оценивать величину возможного перегрева. В перспективе это позволит определять и ресурс работы лопатки.

Трудности диагностики системы охлаждения лопатки тепловым методом обусловлены конструкцией лопатки, внутренние каналы которой имеют малые геометрические размеры и сложную форму проточной части.

При этом высокая теплопроводность материала лопатки приводит к быстрому растеканию тепла и сильному выравниванию температуры на ее поверхности. Кроме того, неоднородность коэффициента излучения поверхности лопатки вызывает существенные артефакты, которые могут превышать эффект от реального температурного перепада. Для решения этих проблем идут по пути интенсификации теплообмена и повышении быстродействия контроля. При этом возникает нестационарный режим, в течение которого проявляются особенности внутренней структуры лопаток. Тем не менее, использование сравнительно недорогих тепловизоров и регулярного режима теплообмена также позволяет получить интегральные оценки качества охлаждения лопатки в различных зонах. Для этого необходимо использование специальных алгоритмов обработки, которые позволят отфильтровать артефакты и выявить слабо охлаждаемые зоны в рамках регулярного режима.

В связи с актуальностью существующей проблемы на предприятии ФГУП «ММП «САЛЮТ»» была разработана методика теплового контроля турбинных лопаток, реализующий ее пакет программ совместно с базой данных, а также спроектирована и изготовлена автоматизированная установка АСТКЛ, в настоящее время применяемая в производстве.

Сущность разработанной методики заключается в предварительном нагреве лопатки с последующим ее охлаждением сжатым воздухом, продуваемым через внутренние каналы. Процесс охлаждения фиксируется с помощью тепловизора и результаты измерения поля температур обрабатываются по оригинальному алгоритму. Полученные результаты сравнивают с эталонными и на основании сравнения делается вывод о наличии дефектов. Кроме того дается оценка пригодности лопатки для использования.

Использование дополнительных специальных методик позволяет на основании полученных результатов при тепловой дефектоскопии лопатки оценить поле температур лопатки при ее работе в составе ГТД.

В основу метода тепловизионного контроля эффективности охлаждения рабочих лопаток турбины положен метод регулярного теплового режима, широко используемый при исследованиях нестационарных процессов теплообмена.

При охлаждении тела в среде с постоянной температурой изменение во времени избыточной температуры тела в любой его точке начиная с некоторого момента времени может быть описано уравнением

$$t_i - t_o = (t_{i0} - t_o) e^{-m(\tau_i - \tau_o)}, \quad (1)$$

где t_i – текущее значение температуры в i -той точке; t_o – температура охлаждающего воздуха; t_{i0} – начальная температура в i -той точке; $\tau_i - \tau_o$ – интервал времени охлаждения между начальной температурой τ_i и температурой τ_o ; m – темп охлаждения.

Наступление регулярного режима охлаждения характеризуется постоянным значением темпа охлаждения m в процессе охлаждения или нагрева и определяется из уравнения (1) его логарифмированием, а именно

$$m = -\frac{\ln(t_i - t_0) - \ln(t_i - t_0)}{\tau_i - \tau_0}. \quad (2)$$

С другой стороны, согласно теории регулярного режима темп охлаждения определяется формулой

$$m = \Psi \frac{F}{\nu c \gamma} \alpha, \quad (3)$$

где Ψ – коэффициент пропорциональности, означающий отношение средней температуры поверхности к средней температуре в объеме тела; F – площадь охлаждаемой поверхности; γ – удельный вес; c – теплоемкость тела; α – коэффициент теплоотдачи.

В соответствии с разработанной в лаборатории тепловидения методикой тепловизионные испытания лопаток проводятся на переменном расходе воздуха. Исходя из анализа условий эксперимента поперечные тепловые потоки оказываются значительно выше продольных. Это позволяет пренебречь растеканием тепла параллельно поверхности лопатки в условиях регулярного режима, и использовать уравнение (3) локально. При этом рассчитывается производная от темпа по расходу:

$$\frac{dm}{dG_{\text{охл}}} = \frac{d\left(\Psi \frac{F}{\nu c \gamma} \alpha\right)}{dG_{\text{охл}}}, \quad \text{или} \quad \frac{dm}{dG_{\text{охл}}} = C \left(\Psi \frac{d\alpha}{dG_{\text{охл}}} + \alpha \frac{d\Psi}{dG_{\text{охл}}} \right), \quad (4)$$

где $C = \frac{F}{\nu c \gamma}$ – является конструктивной характеристикой лопатки ТВД

для каждого локального участка. В частном случае – соответствующего одному пикселю на кадрах термофильма.

В принятых приближениях коэффициент Ψ определяется локальными особенностями лопатки и практически не зависит от расхода. Поэтому вторым слагаемым в (4) можно пренебречь. В то же время первое зависит как от конструктивных особенности локальной области ($C\Psi$), так и от качества охлаждения ($d\alpha / dG_{\text{охл}}$).



Рис. 1. Автоматизированная установка для инфракрасной диагностики охлаждаемых лопаток турбин (АСТКЛ)

Лопатка № 1Е9026
 Неохлаждаемых зон 13,17%
 Эталон 1
 Критерий отбора 0,50
 Перепад на шум 7,00 °С
 Т рамки 165,00 °С
 Т продувки 35,00 °С
 Р начальное 4,21 кг/см²
 Р конечное 2,74 кг/см²
 Сглаживание есть

Градация качества охлаждения:
 ■ <0,25
 ■ 0,25-0,5
 ■ 0,5-0,75
 ■ >0,75



Рис. 2. Диаграмма распределения коэффициента качества охлаждения при засорении канала охлаждения в верхней части лопатки со стороны корытца лопатки

Потому предложенный параметр позволяет анализировать качество охлаждения лопатки и принимать решение о пригодности лопатки к эксплуатации по полученным данным на основании сравнения с эталонными данными. В случае частичной, или полной закупорки канала величина производной от темпа температуры по расходу воздуха для пикселей, соответствующих этому каналу, будет отличаться от эталонных величин. Аналогичным образом проявляют себя и локальные участки с ухудшенной теплопроводностью.

Оценка качества внутреннего охлаждения лопаток турбин, в частности, для выявления дефектов, вызванных наличием посторонних включений во внутренних полостях, налетами на стенках каналов охлаждения, перераспределением расхода воздуха в каналах, либо другими причинами, осуществляется автоматизированной установкой для инфракрасной диагностики охлаждаемых лопаток турбин (АСТКЛ). В состав установки входят: стенд, компрессорный модуль, тепловизор и компьютер для управления установкой и обработкой получаемых результатов.

Получаемые при проведении испытаний лопаток данные позволяют прогнозировать тепловое состояние лопатки при ее работе в составе ГТД. Прогноз теплового состояния основан на сравнении реального распределения коэффициента качества внутреннего охлаждения с распределением, полученным для эталона. Кроме того предварительно проводится тепловой расчет для конкретной конструкции лопатки, результатом которого является распределение коэффициентов, связывающих результаты теплового расчета и результаты испытаний лопатки.

Описанная методика реализована пакетом программ, позволяющим рассчитать поле максимальных отклонений прогнозируемых температур на поверхности лопатки при ее эксплуатации от расчетных величин. На основании значений возможного перегрева при работе лопатки в составе ГТД может быть принято решение о ее пригодности.

Список литературы

1. **Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.** Диагностика безопасности. Тепловой контроль / Под общей редакцией академика РАН Ключева В.В. – М.: Издательский дом Спектр, 2011. 171 с.
2. **Кулиниченко В.Р.** Справочник по теплообменным расчетам. – К.: Техника, 1990. 165 с.
3. **Определение** эффективности охлаждения лопаток с помощью тепловидения. Тяжелое машиностроение. 1991. № 2.
4. **Копелев С.З., Слитенко А.Ф.** Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД. – Харьков: «Основа», 1994. 240 с.
5. **Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.** Диагностика безопасности. Тепловой контроль. Под общей редакцией академика РАН Ключева В.В. – М.: Издательский дом Спектр, 2011. 171 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

Абрамов А.С., Шатерников С.В.

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), Москва, Россия

Доклад посвящен комплексной диагностике объектов и систем жилищно-коммунального хозяйства. Существующие методы контроля качества строительных сооружений, фактического состояния теплозащиты всех типов ограждающих конструкций и энергетических объектов уже давно устарели. Тепловизионная диагностика является очень эффективным инструментом для выявления аномальных температур на поверхности контролируемых объектов, в частности для обнаружения утечек тепла из систем теплоснабжения жилых и производственных зданий. Этот метод позволяет оперативно в реальном масштабе времени получать информацию о состоянии оборудования линий электропередач на ранних стадиях развития дефекта. Особенно эффективно применяется при контроле низковольтного электрооборудования, так как позволяет выявить скрытые дефекты при

монтаже и при работе коммутирующей аппаратуры и защитных устройств. Тепловизионная диагностика может применяться вместе с вибродиагностикой для контроля технического состояния электромеханического оборудования в качестве дополнительного метода контроля. Метод является основным для энергоаудиторов при инструментальном обследовании объектов и систем, т.к. он объективно позволяет оценить техническое состояние зданий, сооружений, систем тепло и водоснабжения, систем электрообеспечения, сетей, автоматизированных систем управления.

В настоящее время применение тепловизионного оборудования и РД 13-04-2006 «Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах», а также методических рекомендаций и регламентов № 1305/442–2001, № 06/442–2001, № 09/442–2001, № 02/442–2002, № 11/442–2002, № 15/442–2003, № 022/442–2003, №52/442–2004 и № 51/442–2004, аттестованных Росстандартом, является обязательным для энергоаудиторов при проведении энергетических обследований.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ БРОНЕВЫХ ПРЕГРАД НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕПЛОМ МЕТОДОМ КОНТРОЛЯ

Ермоленко А.Ф., Будадин О.Н., Харченко Е.Ф.
*ОАО «ЦНИИ Специального машиностроения»,
Хотьково, Московской обл., Россия*

В средствах индивидуальной броневого защиты и защиты различных объектов техники широкое применение находят полимерные материалы, используемые как в виде тканей из высокопрочных волокон различной природы (арамидных, сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых), так и в виде полимерных композиционных материалов на их основе. При взаимодействии поражающих элементов (ПЭ) стрелкового и артиллерийского оружия с композитными броневыми преградами в материалах преград одновременно протекают весьма сложные, часто взаимосвязанные и взаимообусловленные, процессы, в результате которых происходит поглощение кинетической энергии ПЭ. К ним относятся разрушения волокон и связующего при растяжении вдоль волокон и при поперечном сжатии, трение между волокнами при их взаимном перемещении, вязкое трение, обусловленное реологическими свойствами волокон и связующих. Относительная энергопоглощающая способность указанных процессов при прочих равных условиях зависит от скорости ПЭ, сами они с трудом поддаются математи-

ческому моделированию. В связи с этим весьма актуальной является разработка экспериментальных методов определения энергопоглощающей способности броневых преград, позволяющих проводить сравнительную оценку материалов и их оптимальное размещение в броневых структурах.

В работе [1] рассмотрен метод определения энергии, поглощаемой броневой преградой, основанный на измерении работы силы сопротивления внедрения ПЭ в запреградную среду. Здесь мы рассмотрим метод, основанный на анализе температурных полей в окрестности места контакта ПЭ с броневой преградой.

С термодинамической точки зрения процессы взаимодействия ПЭ с броневыми преградами в силу их быстротечности могут рассматриваться как адиабатические, когда теплопередачей можно пренебречь, и вся энергия, отнятая преградой от ПЭ, переходит во внутреннюю энергию материала преграды и может быть выражена соотношением:

$$\Delta E = \Delta Q = \iiint_V \rho C(T) \Delta T(\vec{r}) dV. \quad (1)$$

Здесь ΔQ и $\Delta T(\vec{r})$ – соответственно и тепловыделение изменение температурного поля в зоне контакта ПЭ с преградой, вызванное их взаимодействием; ρ и $C(T)$ – соответственно плотность и удельная теплоемкость материала преграды; \vec{r} – радиус-вектор; V – область броневой преграды, в которой происходит поглощение кинетической энергии ПЭ.

Для случая относительно тонкой преграды, когда температурное поле может быть принято постоянным по ее толщине, выражение (1) принимает вид

$$\Delta E = h \iint_{\Omega} \rho C(T) \Delta T(x, y) dx dy, \quad (2)$$

где h – толщина преграды; Ω – область зоны взаимодействия на поверхности преграды.

Таким образом, если плотность и удельная теплоемкость материала преграды известны, то для тонких преград поглощенная ими кинетическая энергия может быть оценена, если известно температурное поле на поверхности преграды.

Это позволяет использовать для исследования энергопоглощающих свойств материалов тепловой контроль [2], основанный на регистрации и анализе температурных полей с использованием тепловизора. Поскольку тепловизор обладает ограниченной разрешающей способностью, измеренное им температурное поле является дискретным, температура принимается постоянной в пределах элемента, площадь ΔS которого определяется разрешающей способностью тепловизора. Все поле зрения тепловизора,

таким образом, разбивается на конечное число элементов указанного выше размера.

Для дискретного случая выражение (2) запишется в виде

$$\Delta E = h\Delta S\rho \sum_{i,j} C(T_{ij})\Delta T_{ij}, \quad (3)$$

где T_{ij} – температура элемента с номером ij ; ΔT_{ij} – ее приращение после соударения ПЭ с преградой. Измерение температурного поля производится с определенным интервалом по времени (интервал опроса), определяемым возможностями тепловизора, т.е. картина теплового поля может быть получено как непосредственно после удара ПЭ по преграде, так и в конце интервала опроса. Это накладывает определенные ограничения на теплопроводность исследуемых материалов с учетом возможных больших градиентов температур в зоне удара. Очевидно, что температура преграды будет оценена тем точнее, чем меньше эти интервалы. В то же время, энергия, поглощенная преградой, будет в меньшей степени зависеть от величины интервала опроса, поскольку все тепло, выделившееся в результате взаимодействия ПЭ с преградой, останется в преграде, если пренебречь теплообменом между преградой и воздухом за время, равное интервалу опроса.

Схема эксперимента по измерению теплового поля преграды после взаимодействия с ПЭ приведена на рис. 1.

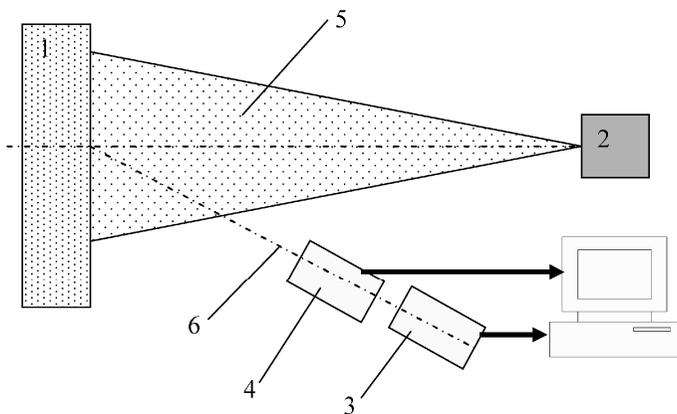


Рис. 1. Схема измерения теплового поля:

1 – исследуемый объект; 2 – тепловизор; 3 – устройство обстрела;
4 – устройство для измерения скорости ПЭ; 5 – поле зрения тепловизора;
6 – траектория полета ПЭ

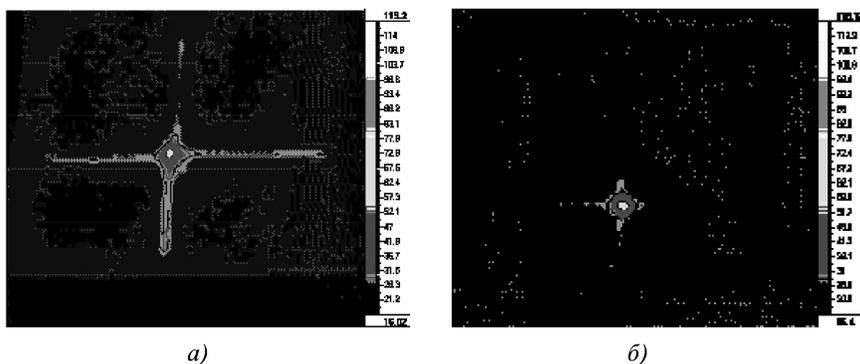


Рис. 2. Термограммы образца из арамидной ткани после выстрела по нему стальным шариком диаметром 6,3 мм со скоростью 365 м/с (а) и 496 м/с (б)

При проведении экспериментальных исследований броневая преграда обстреливалась со скоростями от 260 до 760 м/с стандартными имитаторами осколка – стальными шариками диаметром 6,3 мм, имеющими массу 1,05 г. Измерение тепловых полей производилось тепловизором марки «ИРТИС-2000», интервал опроса для которого составлял (1,0...1,5) с. Для визуализации картины распределения тепла, выделившегося за счет поглощения кинетической энергии ПЭ, и расчета суммарной поглощенной энергии по формуле (3), было доработано и оттестировано программное обеспечение тепловизора.

В качестве объекта исследования использовался четырехслойный пакет из баллистической ткани на основе арамидных волокон РУСАР. Суммарная поверхностная плотность пакета составляла $0,5 \text{ кг/м}^2$.

На рис. 2 (а, б) в одинаковых масштабах приведены характерные термограммы, иллюстрирующие распределение температуры по поверхности исследуемого броневго пакета для начальной скорости ПЭ, равной 365 м/с (рис. 2, а) и 496 м/с (рис. 2, б).

Как видно из предварительно обработанных для повышения информативности изображения термограмм, приведенных на рис. 2, тепловизор позволяет получить наглядные картины температурных полей преграды в окрестности места ее столкновения с ПЭ. Температурные поля анизотропны, их анизотропия определяется анизотропией ткани – зоны повышенной температуры ориентированы вдоль направления ее нитей. Для относительно низкой и высокой скоростей соударения ПЭ с преградой температурные поля преграды качественно отличаются: при низкой скорости нити ткани вовлекаются в деформирование на длине существенно большей, чем при высокой. Ширина полосы, в которой имеет место заметное вовлечение нитей в деформирование близка к калибру ПЭ.

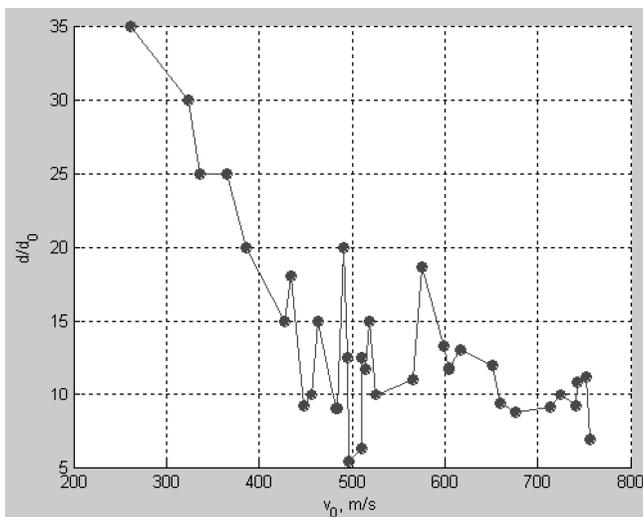


Рис. 3. Экспериментальная зависимость относительного размера зоны вовлечения в деформирование нитей арамидной ткани РУСАР от начальной скорости ПЭ

На рис. 3 приведена зависимость относительного размера зоны вовлечения нитей в деформирование от начальной скорости ПЭ, полученная путем обработки термограмм.

Как видно из рисунка, размер зоны вовлечения нитей в деформирование снижается с увеличением скорости ПЭ и в диапазоне скоростей (450...550) м/с достигает минимального значения.

Поскольку броневые преграды могут иметь различную поверхностную плотность, а поражающие элементы – различный калибр, энергопоглощающую способность материалов удобно характеризовать величиной определяемой выражением

$$\beta_E = \frac{\Delta E}{\rho_s S_0} . \quad (4)$$

Назовем ее параметром баллистической эффективности материала. В формуле (4) ρ_s – поверхностная плотность преграды,

$$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} , \quad (5)$$

где d_0 – калибр ПЭ.

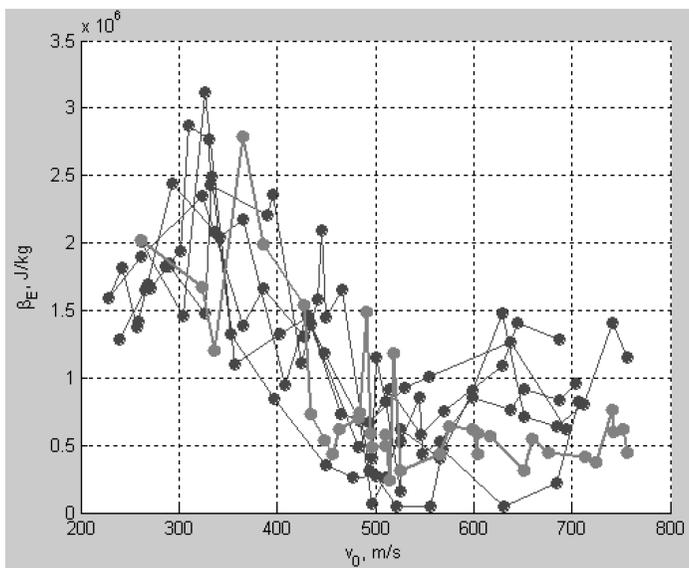


Рис. 4. Экспериментальные зависимости параметров баллистической эффективности арамидной ткани РУСАР от начальной скорости ПЭ, полученные по методу, основанному на измерении работы силы сопротивления внедрения ПЭ в запреградную среду (синие кривые) и тепловым методом (красная кривая)

На рис. 4 даны зависимости параметра баллистической эффективности исследуемого материала от начальной скорости ПЭ, полученные по методике, основанной на измерении работы силы сопротивления внедрения ПЭ в запреградную среду [1], и тепловым методом – путем обработки термограмм.

Из рис. 4 видно, что зависимости $\beta_E(v_0)$ имеют ярко выраженный статистический характер, в интервале скоростей ПЭ (260...600) м/с, полученная тепловым методом, статистически значимо не отличается от соответствующих зависимостей, полученных по методу, в котором используется запреградная среда. В окрестности начальной скорости ПЭ, равной 500 м/с, оба метода обнаруживают наличие аномально низкой баллистической эффективности броневого преграды («окно прозрачности»). Для объяснения его существования по-видимому, необходимо исследовать механические характеристики (прочность и податливость) арамидных текстильных структур при поперечном сжатии давлениями, уровень которых соответствует уровню давлений, возникающих при динамическом контакте с ПЭ.

При скоростях ПЭ, больших 600 м/с, тепловой метод показывает, что энергопоглощающая способность текстильной арамидной броневой преграды стабилизируется и колеблется близи некоторого постоянного уровня. Напротив, метод, использующий запреградную среду, указывает на тенденцию ее возрастания с увеличением скорости ПЭ, что может свидетельствовать о наличии дополнительных ресурсов энергопоглощения, арамидных материалов при высоких скоростях взаимодействия с ПЭ. Выяснение причины такого расхождения требует проведения дополнительных исследований.

Из сопоставления рис. 3 и 4 следует, что энергопоглощающая способность текстильной броневой структуры зависит от объема материала, вовлеченного в деформирование, и возрастает с уменьшением скорости ПЭ. При высоких скоростях взаимодействия ПЭ с текстильной броневой преградой ее высокопрочные нити «не успевают» натянуться до исчерпания их несущей способности на достаточной длине и, в связи с этим, в потенциальную энергию деформации нитей переходит относительно меньшая, чем при малых скоростях, доля кинетической энергии ПЭ.

Наличие ниспадающего участка зависимости $\beta_E(v_0)$ при малых скоростях ПЭ объясняется тем, что на этом участке не происходит пробития преграды, и ею поглощается вся кинетическая энергия ПЭ, убывающая с уменьшением его скорости.

Тепловой метод позволил произвести непосредственные измерения температуры материала броневой преграды в зоне ее контакта с ПЭ. На рис. 5 приведены зависимости максимального приращения температуры брони от начальной скорости ПЭ.

Из рисунка видно, что зависимость $\Delta T_{\max}(v_0)$ также имеет статистический характер, имея тенденцию к возрастанию с ростом начальной скорости ПЭ. В окрестности скорости $v_0 = 520$ м/с имеет место аномально низкое приращение температуры.

Тепловизионный метод в дополнение к результатам, полученным по методу, основанному на определении энергии ПЭ, поглощаемой запреградной средой, позволил получить наглядные картины и количественные характеристики температурных полей в зонах взаимодействия брони с ПЭ и оценить размеры этих зон при различных скоростях ПЭ.

Полученная тепловизионным методом зависимость энергии, поглощаемой преградой, от скорости ПЭ подтвердила наличие обнаруженного другими методами «окна прозрачности» – интервала скоростей ПЭ, в котором броневые преграды из арамидных материалов имеют аномально низкую энергопоглощающую способность.

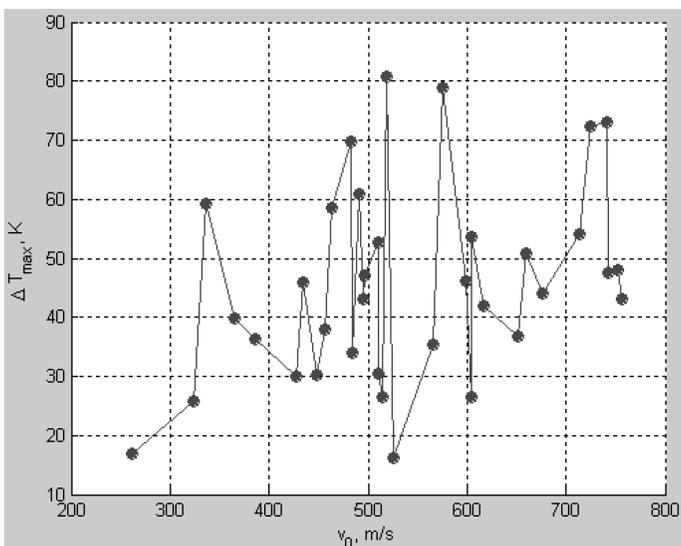


Рис. 5. Экспериментальная зависимость максимального увеличения температуры арамидной ткани РУСАР от скорости ПЭ

Рассмотренный в данной работе метод представляется перспективным для исследования процессов взаимодействия ПЭ с броневыми структурами из полимерных материалов, его использование позволит эффективно производить отбор материалов для броневых структур с целью повышения их защитные свойства.

Экспериментальные работы проводились в баллистической лаборатории НПЦ «Армоком-Центр». Авторы выражают благодарность М.А Гульбису и В.А. Машковцеву за помощь при организации и проведении экспериментов.

Литература

1. Харченко Е.Ф., Ермоленко А.Ф. Изменение энергопоглощения текстильных бронематериалов в зависимости от скорости поражающих элементов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2010. Вып. 1(156) – 2(157).
2. Салихов З.Г., Будадин О.Н., Ишметьев Е.Н., Абрамова Е.В. и др. Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения. – М.: ИД МИСиС, 2008. 476 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ РАССЛОЕНИЙ В СЕТЧАТЫХ СТРУКТУРАХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ КОНТРОЛЯ

Филиппенко А.А., Слитков М.Н., Муханов Е.Е.

ОАО «ЦНИИ Специального машиностроения»,
Хотьково, Московская обл., Россия

Существует и находит все большее применение большой класс изделий из полимерных композиционных материалов в общем виде представляющих собой силовые оболочки, состоящие из сетчатого несущего или защитного слоя, образованного намоткой из высокомодульного армирующего материала и одной или нескольких обшивок, армированных различным образом в зависимости от функций, выполняемых каждой обшивкой.

Это так называемые «сетчатые» или «сотовые структуры» (рис. 1, б). Обладая малым весом они имеют прочностные характеристики значительно превышающие характеристики традиционных изделий. Они имеют широкое применение в тех областях техники, где требуется малый вес с одновременно высокими прочностными характеристиками. Это ракетостроение, авиастроение и т.п.

Как правило, в таких конструкциях возникают два основных типа дефектов нарушения сплошности: расслоения между оболочкой и ребрами и расслоения в самих ребрах. Поскольку эти дефекты могут располагаться друг над другом, это исключает применение теневых методов.

В настоящем докладе изложены результаты разработки технологии теплового контроля сетчатых структур из полимерных композиционных материалов, проведенной в соответствии с [1].

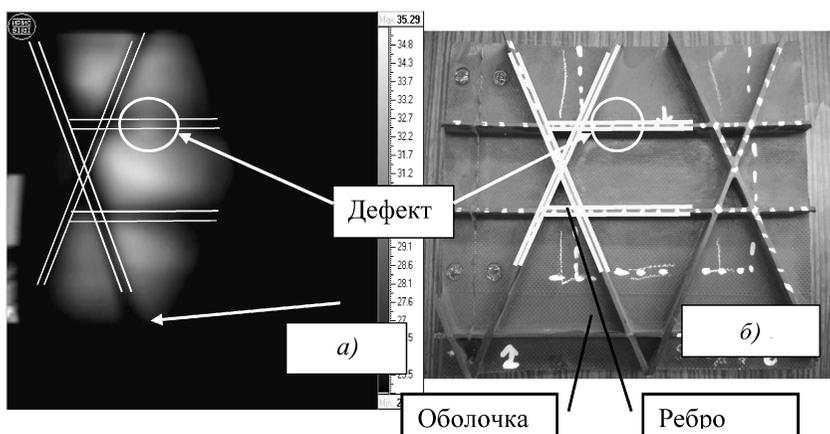


Рис. 1. Термограмма (1, а) и фотография (1, б) сетчатой структуры

**Зависимости изменения температуры на
дефектном участке от времени**

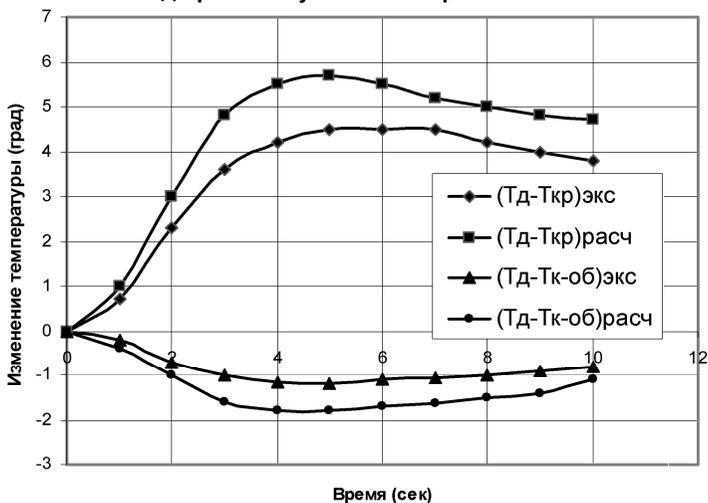


Рис. 2

Сформулирована задача теплопроводности, описывающая процесс распространения тепла в сетчатой структуре, заключающаяся в решении нестандартного уравнения теплопроводности

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T(X, Y)) + W(X, Y, t) \quad (1)$$

для $(X, Y) \in V_i$, где V_i – области, соответствующие различным прямоугольным областям изделия; C, ρ – теплоемкость, плотность; λ – тензор теплопроводности; W – плотность внутренних источников тепла. Причем C, ρ, λ являются кусочно-постоянными функциями пространственных координат (для каждого слоя C, ρ и λ – константы).

Материал, заполняющий слой изделия считаем, ортотропным, причем оси ортотропии совпадают с осями координат, т.е. в координатах OXY :

$$\tilde{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}.$$

Для проведения теплового контроля сетчатая структура подвергается поверхностному нагреву источником с интенсивностью $q(t, y)$. Поэтому на границе $X = 0$ выполняется условие

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial X} + \alpha T = q(t, y), \quad (2)$$

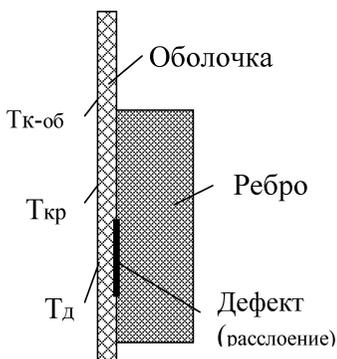


Рис. 3

С использованием разработанной математической модели проведены исследования возможности обнаружения дефектов типа расслоений между ребрами и подкрепляющей оболочкой и определены оптимальные режимы контроля.

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические результаты.

На рис. 2 в виде графиков приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Здесь T_d – температура на дефектной области по центру ребра; $T_{кр}$ – температура на качественной области по центру ребра; $T_{к-об}$ – температура вблизи дефектной области вне ребра.

Индекс «экс» обозначает принадлежность результатов к экспериментальным исследованиям, соответственно индекс «расч» – принадлежность результатов к теоретическим (расчетным) исследованиям.

На рис. 1, а приведены результаты экспериментальных исследований - термограмма с отмеченной областью дефекта типа отслоения ребра от оболочки (линиями на термограмме и фотографии обозначены границы ребер).

На рис. 3. приведена схема, поясняющая обозначения, представленные на рис. 2.

Тепловой контроль позволяет определять расслоения между оболочкой и ребрами.

Для обнаружения расслоений в ребрах разработана технология.

Литература

1. Салихов З.Г., Будадин О.Н., Ишметьев Е.Н., Абрамова Е.В. и др. Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения. – М.: ИД МИСиС, 2008. 476 с.

2. Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Диагностика безопасности. Тепловой контроль. Под общей редакцией академика РАН Ключева В.В. – М.: Издательский дом Спектр, 2011. 171 с.

где α – коэффициент теплообмена. (Поскольку рассматриваемая задача линейная, то температура окружающей среды при проведении теоретических исследований без ограничения общности полагается равной нулю).

На остальной части внешней границы области выполняется условие теплообмена:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha T = 0, \quad (3)$$

где \vec{n} вектор единичной внешней нормали к границе области V_i .

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Абрамова Е.В.

НУЦ «Качество», Москва, Россия

Проведенный анализ конструкции изделия показал, что участки оболочки, расположенные между ребрами, можно рассматривать как участки мембраны (вследствие большой жесткости ребер и малой толщины оболочки). Эти участки выгибаются в ту или иную сторону в зависимости от направления приложенной нагрузки.

Различия в поведении конструкции в случае наличия или отсутствия адгезии между ней и ребром дает принципиальную возможность выявлять отслоения ребер по характеру прогиба оболочки в зависимости от приложенной нагрузки и делать прогноз поведения конструкции в различных условиях нагружения и ее работоспособности.

Проведенные исследования показали, что нагрев поверхности оболочки на $10...25^\circ$ вызывает ее «прогиб» на $8...18$ мкм, что вполне достаточно для регистрации методом голографической интерферометрии, основанном на регистрации и анализе голографического интерференционного видеоизображения. Интерференция возникает вследствие наложения двух пучков: опорного – от источника монохроматического излучения (лазера) и предметного – отраженного от поверхности исследуемого объекта в процессе его нагружения.

Функциональная схема голографического контроля приведена на рис. 1.

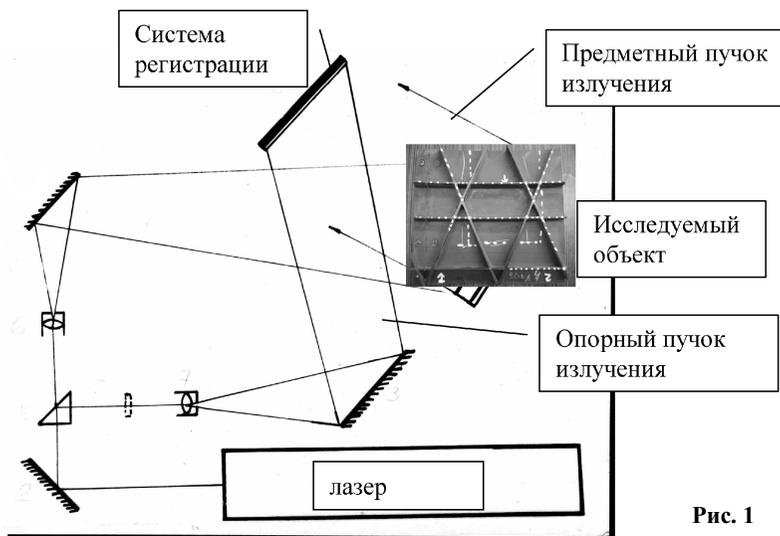


Рис. 1

В общем случае отклик нагреваемой поверхности на величину прилагаемой тепловой нагрузки можно выразить следующей зависимостью:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\alpha}\Delta T + f(E_i, (T), h, \nu_i), \quad (1)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – деформация поверхности контролируемого изделия; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплового линейного расширения $\alpha = f(\bar{\varepsilon})$; ΔT – перепад температуры между качественной и дефектной областями; $E_i, (T), h, \nu_i$ – модуль упругости, толщина и коэффициент Пуассона i -го слоя.

Были проведены теоретические исследования зависимости термодформационных смещений точек расчетной сетки на ячейке периодичности изделия от температуры нагрева, обобщенных механических характеристик пакета материала и т.п. На рис. 2 в качестве примера приведены результаты исследований в виде изображений полей перемещений.

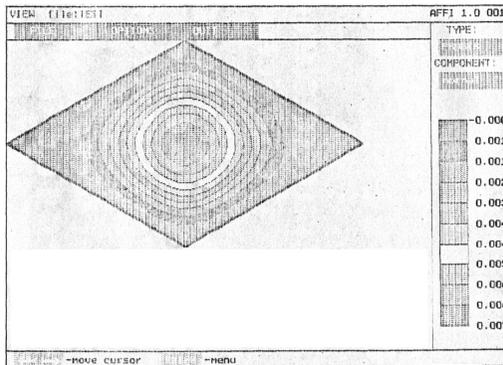


Рис. 2. Перемещения в случае отсутствия дефектов в районе ребер



Рис. 3. Поле перемещений при наличии одного дефекта



Рис. 4. Поле перемещения при наличии двух дефектов

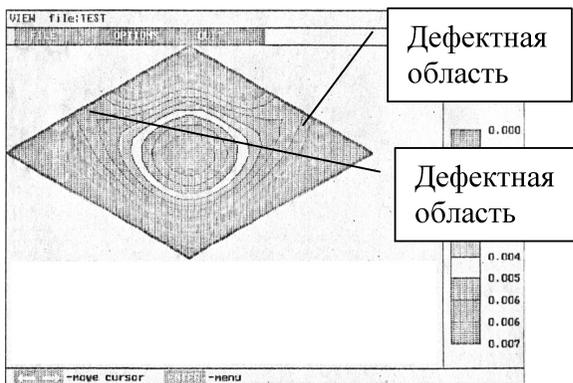


Рис. 5. Поле перемещений при наличии двух дефектов на соседних ребрах

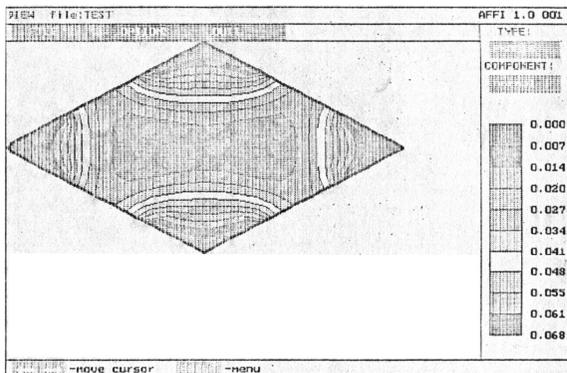
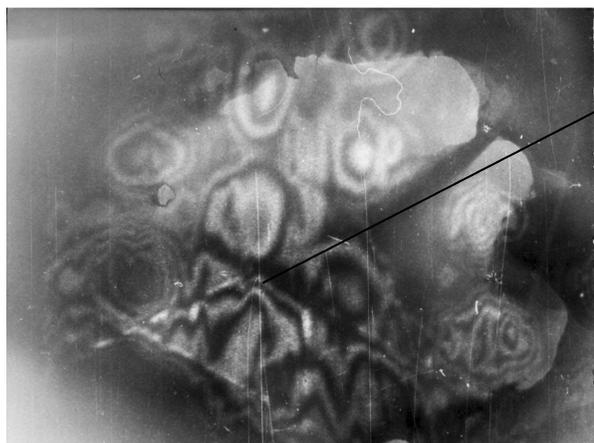


Рис. 6. Поле перемещения при наличии четырех дефектов



Дефектная
область

Рис. 9. Голографическая интерферограмма образца с искусственным дефектом



Дефектная
область

Рис. 10. Голографическая интерферограмма образца с искусственным дефектом

СЕКЦИЯ № 3. ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции: Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н.,
Шаберников В.Е.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВИХРЕТОКОВОГО ДЕФЕКТΟΣКОПА ВД-90НП ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ВО ВРЕМЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Шубочкин А.Е., Ефимов А.Г.

ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

Роль трубопроводного транспорта в системе экономической безопасности России, обладающей запасами углеводородного сырья мирового значения, неопределима, поскольку транспортировка нефти и газа с использованием трубопроводов является экономически наиболее выгодным способом доставки этих видов сырья, что обуславливает особое внимание к вопросам их диагностики. На сегодняшний день значительная часть российских газопроводов имеет существенный износ, и вопросы, связанные с контролем их состояния и прогнозированием остаточного ресурса, имеют важное значение для нормального функционирования отрасли.

К вихретоковым дефектоскопам, используемым для неразрушающего контроля магистральных газопроводов предъявляют ряд весьма специфических требований. Вихретоковые дефектоскопы обязаны:

- сохранять работоспособность в диапазоне температур от -30 до $+50$ °С;
- быть устойчивы к атмосферным воздействиям (снег, дождь и т.д.);
- выявлять дефекты на криволинейных поверхностях с значительной шероховатостью;
- обеспечивать возможность контроля по коррозии;
- обеспечивать удобство работы и не сковывать свободу движений дефектоскописта;
- обладать малой массой;
- выявлять дефекты от 0,3 мм при шероховатости поверхности Rz40;
- обеспечивать протоколирование результатов контроля;
- выявлять дефекты через изоляционное покрытие трубопровода.

Всем указанным требованиям в полной мере отвечает вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП специально разработанный с учетом опыта эксплуатации средств неразрушающего контроля при контроле магистральных

трубопроводов. В настоящее время НПЦ «Молния» эксплуатирует 7 дефектоскопов ВД-90НП. Всего с использованием ВД-90НП и других средств неразрушающего контроля было проконтролировано более 300 км магистрального газопровода и проконтролировано более 40000 м², что позволило обобщить полученный опыт и провести сравнительный анализ используемых приборов.

По результатам эксплуатации было отмечено значительное преимущество перед имеющимися аналогами по весу, удобству работы, точности определения глубины дефекта, числу ложных срабатываний, величине порогового дефекта. Также были отмечены ряд недостатков, связанных с обеспечением работоспособности дефектоскопа в тяжелых условиях эксплуатации, в частности при температурах до –40 °С и ниже анализируя замечания и предложения эксплуатирующих организаций специалисты ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр» постоянно ведут работу по модернизации вихретокового дефектоскопа ВД-90НП, чтобы обеспечить высокую достоверность контроля, обеспеченную надежностью прибора и его характеристиками. Одним из наиболее существенных замечаний является требование к значительному (до 10 раз) увеличению скорости контроля, чтобы обеспечить синхронизацию проводимых работ с работой другого оборудования в составе механизированной колонны и обеспечить темп движения до 500 погонных метров в смену. Для решения этой задачи ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр» разрабатывает многоканальный вихретоковый дефектоскоп ВД-91НМ, обладающий всеми преимуществами ВД-90НП, но значительно увеличивающий скорость и достоверность контроля за счет применения многоканальной системы с последующей визуализацией результатов контроля.

РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВЫХ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Сясько В.А., Ивкин А.Е.

ЗАО «Константа», С.-Петербург, Россия

В машино-, авиа- и ракетостроении широко распространены изделия из цветных металлов с ферромагнитными электропроводящими покрытиями. В большинстве случаев диапазон толщин покрытий составляет от 1 до 20 мкм. Использование вихретоковых фазовых методов в указанном диапазоне толщин затруднено в связи с наличием мертвых зон (зон неопределенности) или малой чувствительности. Вихретоковые частотные методы не обеспечивают подавления мешающих параметров – зазора, шероховатости и девиации радиуса основания.

Для решения указанных задач были разработаны структура малогабаритного амплитудно-фазового преобразователя со встроенной электроникой и конструкция его чувствительного элемента. Также была разработана методика снятия и обработки двухпараметровой градуировочной характеристики, позволяющая исключить мертвую зону при измерениях и подавить мешающие геометрические параметры основания на погрешность измерения, в том числе для покрытий с электропроводностью меньшей, чем электропроводность основания. В докладе приведены структурная схема преобразователя и его конструкция, основные соотношения для расчета характеристик, методики подавления мешающих параметров и алгоритмы преобразования измерительной информации. Также изложены результаты испытаний разработанных преобразователей в комплекте с толщиномером Константа К6 (гальванический) на образцах продукции широкой номенклатуры.

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ С ИЗМЕРЕНИЕМ СИЛЫ ЛОРЕНЦА

Пахомов Д.Н.¹, Брауер Х.², Лунин В.П.¹

¹*ГОУ ВПО «Московский энергетический институт
(технический университет)», Москва, Россия*

²*Технический университет Ильменау,
Германия*

Неразрушающий контроль проводящих объектов требует высокой надежности и точности для обнаружения трещин и дефектов на ранней стадии развития. Для повышения чувствительности вихретокового контроля применяют токи возбуждения высокой частоты или многочастотные методы. Однако в этом случае становится очень трудно обнаружить дефекты, лежащие на обратной стороне или внутри объектов большой толщины, из-за так называемого «поверхностного эффекта». В данной работе рассмотрена новая методика обнаружения дефектов, которая является практически независимой от частоты возбуждающего тока и, как следствие, от глубины проникновения вихревых токов.

Известно, что взаимодействия магнитного поля и вихревых токов приводят к силе Лоренца с плотностью $f = \vec{j} \times \vec{B}$. В данной работе будет рассмотрено движение алюминиевой пластины относительно неподвижной намагничивающей системы и измерение возникающей при этом силы Лоренца.

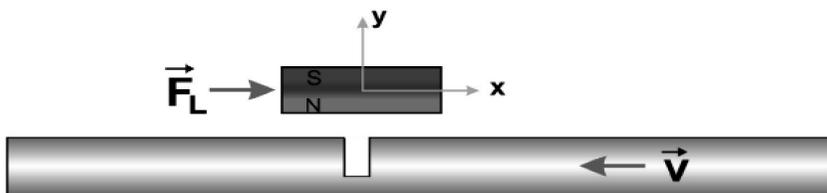


Рис. 1. Схема контроля:

v – скорость движения алюминиевой пластины; F_L – сила Лоренца

Принимая во внимание, что сила Лоренца (F_L), действующая на магнит, была измерена во время движения алюминиевой пластины, величина силы на длину (f_L) в пластине была вычислена по следующей формуле:

$$f_L = \int \int_{S \text{ Al}} B dS .$$

Целью данного исследования является получение основной информации для количественной оценки размеров дефектов с помощью вихретокового контроля с использованием силы Лоренца (прямая задача) и построение калибровочных характеристик, с помощью которых можно количественно оценить размеры дефекта (обратная задача). База данных составлена из сигналов от прямоугольных дефектов различных конфигураций. Глубина дефектов принимала значение 2, 3 и 4 мм, ширина дефектов – 1, 3 и 5 мм. Скорость движения алюминиевой пластины относительно постоянного магнита составляла: 1, 1,75 и 2,5 м/с. Получение сигналов производилось посредством моделирования методом конечных элементов процесса контроля. Модель, состоящая из постоянного магнита и алюминиевой пластины с различной конфигурацией дефектов, была сформирована в пакете Comsol Multiphysics версии 3.3, позволяющем моделировать различные физические процессы.

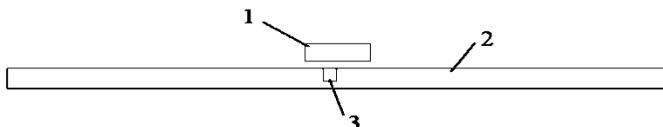


Рис. 2. Двухмерная модель:

1 – постоянный магнит; 2 – алюминиевая пластина; 3 – дефект

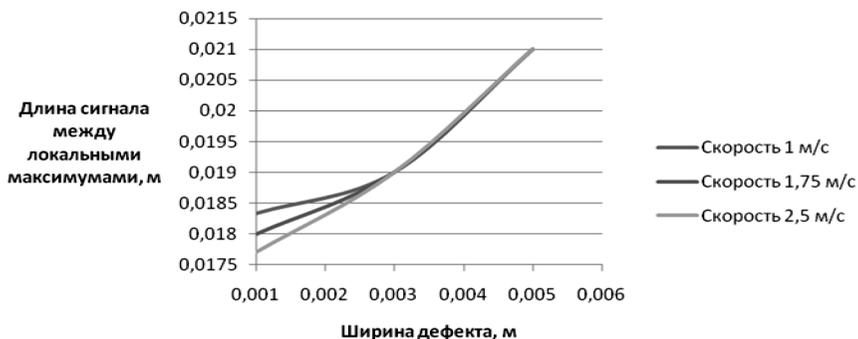


Рис. 3. Калибровочные характеристики для разных скоростей

Каждый дефект «перемещался» с левого края до правого края пластины, скорость которой вместе с дефектом равнялась 1, 1,75 и 2,5 м/с относительно неподвижного магнита, с шагом в 1 мм и в каждой точке рассчитывалось значение силы Лоренца в пластине.

После получения базы сигналов были выявлены информативные признаки сигналов, проведена статистическая обработка полученных значений информативных признаков, цель которой – выделить параметры, наиболее коррелирующие с изменением геометрических размеров дефектов (глубины и ширины). На изменение ширины дефекта больше всего реагирует длина сигнала между локальными максимумами, а на изменение объема дефекта – амплитуда сигнала. Далее можно переходить к построению калибровочных характеристик, по которым мы легко сможем определить величину ширины дефекта, а по калибровочной характеристике объема, зная ширину, сможем узнать и глубину, так как объем в случае двухмерной задачи есть произведение глубины и ширины дефекта.

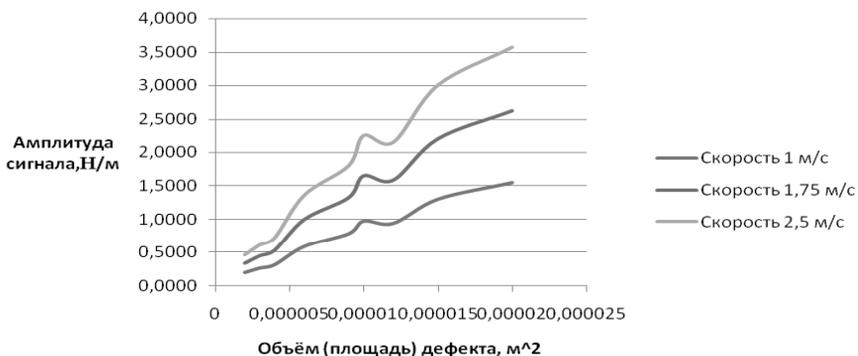


Рис. 4. Калибровочные характеристики для разных скоростей

В заключении можно сказать, что был смоделирован процесс контроля, получена база сигналов, выявлены информативные параметры, проведен корреляционный анализ и построены калибровочные характеристики. Дальнейшая работа должна быть направлена на уменьшение погрешности определения геометрических параметров дефектов с помощью калибровочных характеристик. В работе не проводилось изучение способов отстройки от мешающих факторов, в первую очередь, от изменения зазора между движущейся пластиной и неподвижным магнитом. В связи с этим работа будет продолжена.

Вихретоковый контроль с использованием силы Лоренца – очень перспективное направление, которое сможет усовершенствовать процедуру контроля стальных листов и пластин и даст новый толчок в развитии вихретокового метода неразрушающего контроля.

Литература

1. **Brauer H., Ziolkowski M.** Eddy Current Testing of Metallic Sheets with Defects Using Force Measurements / SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING Vol. 5, No. 1, May 2008.

2. **Лунин В.П.** Под ред. Покровского А.Д. Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники / Изд-во МЭИ, 1996.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ВИХРЕТОВОМ КОНТРОЛЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ

Крюков А.С., Лунин В.П., Жданов А.Г.
*Московский Энергетический Институт
(Технический Университет), Москва, Россия*

Доклад посвящен вопросу неразрушающего контроля одного из важнейших узлов атомных электростанций (АЭС), использующих реакторы на легкой воде, а именно, парогенераторов (ПГ). ПГ состоит из горячего и холодного коллектора и из нескольких тысяч теплообменных трубок (ТОТ), которые ориентированы и расположены горизонтально с помощью специальных дистанционирующих и антивибрационных решеток. Для оценки состояния ТОТ ПГ в процессе эксплуатации наиболее эффективно применение метода вихретокового контроля (ВТК).

При ВТК труб применяются датчики трех типов. Самый простой – это внутренний проходной дифференциального типа. Более сложная конструкция – вращающийся датчик с тремя катушками, расположенными по диа-

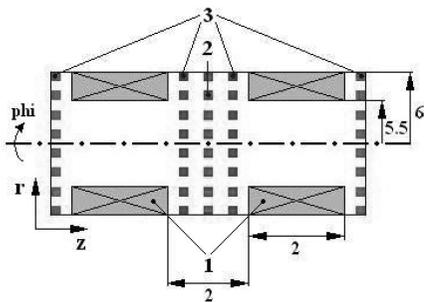


Рис. 1. Схема исследуемого датчика
(все размеры указаны в мм)

метру через 120° (причем две из них плоские и одна состоящая из двух ортогонально ориентированных обмоток). Данный тип используется для определения геометрии дефектов. Недостаток такого датчика – большие объемы получаемых данных при пониженной скорости перемещения. Достоинства первых двух типов (скорость и возможность оценивания геометрии дефекта) объединяет в себе многосекционный датчик – у него катушки расположены так, чтобы зона контроля покрывала всю трубу по окружности. Недостаток этого типа датчиков – сложность конструкции и дороговизна.

Предлагаемая в данной работе конструкция вихретокового преобразователя для контроля труб ПГ совмещает в себе достоинства рассмотренных выше датчиков и устраняет их недостатки.

Исследуемый датчик представляет собой внутренний проходной вихретоковый преобразователь с особой схемой регистрации сигналов, которая позволяет увеличить число информативных параметров и дает возможность судить о геометрии дефекта при относительной простоте конструкции. На рис. 1 представлена схема исследуемого датчика. Он состоит из двух согласно включенных возбуждающих катушек (1) и расположенных по окружности магнитных преобразователей (МП) (2). В качестве МП могут быть использованы, например, преобразователи Холла (ПХ) или индукционные преобразователи (ИП). Их количество должно быть таким, чтобы обеспечить надежное выявление минимального дефекта, а геометрические размеры стремиться к точечным. Кольцо МП расположено соосно с возбуждающими катушками и находится на одинаковом расстоянии от каждой из них. Возможен случай использования двух колец преобразователей, помещенных между катушками или с их внешних сторон (так). В этом случае будет фиксироваться дифференциальный сигнал. Ориентировать МП необходимо таким образом, чтобы сигнал при наличии дефекта был максимальным.

Таким образом, комбинируя полученные сигналы катушек (амплитуда, фаза) и колец магнитных преобразователей, появляется хорошая возможность для надежного выявления и подробного анализа различного рода дефектов.

В программном пакете Comsol Multiphysics была построена модель исследуемого преобразователя. Труба парогенератора имеет следующие геометрические размеры: внешний радиус 8 мм, внутренний – 6,5 мм.

В ходе решения задачи были использованы два вида дефектов труб: внешний продольный и внешний поперечный. Переменной являлась только глубина дефекта, которая принималась равной 20, 40, 60, 80 и 100 процентам от толщины стенки трубы. Длина дефекта составляла 5 мм, ширина – 0,5 мм. За основную частоту, используемую при расчете, была принята частота равная 60 кГц. Удельная проводимость материала трубы парогенератора 1 МСм/м. Плотность тока в возбуждающих катушках – 1 А/мм².

Как уже отмечалось, результатами моделирования стали не только сигналы, снятые непосредственно с катушек, но и распределения магнитных полей по окружностям, на которых были расположены магнитные преобразователи. В итоге, для каждой точки окружности получили по 9 информативных параметров – три составляющие реальной части индукции, три составляющие мнимой части и три составляющие модуля.

Графически полученные распределения магнитного поля можно представить так, как показано на рис. 2. Ось X – направление перемещения датчика в процессе контроля; ось Y представляет собой развернутое кольцо, вдоль которого расположены магнитные преобразователи (0 – номер датчика, расположенного непосредственно под дефектом); вдоль оси Z отложены значения магнитной индукции, соответствующие данному положению дефекта и данному номеру МП.

Были проанализированы все возможные сигналы магнитных преобразователей. На их основе была получена оценка возмущения поля от исследуемого дефекта порядка единиц мкТл. Измерение таких слабых магнитных полей с помощью традиционных магнитных преобразователей без применения специальных способов усиления представляется затруднительным. Были также предприняты попытки увеличить величину магнитного поля с помощью увеличения плотности тока в возбуждающих катушках, а также с помощью увеличения площади сечения катушки.

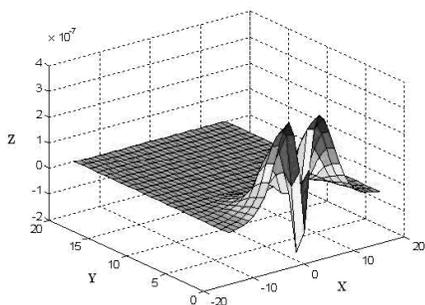


Рис. 2. Распределение реальной части радиальной составляющей магнитной индукции для центрального кольца магнитных преобразователей (поперечный дефект $5 \times 0,5 \times 0,3$ мм):

ось X – ось движения дефекта; ось Y – номер датчика в кольце; ось Z – величина магнитной индукции, Тл

В работе также были получены градуировочные характеристики для определения глубины продольного и поперечного дефектов по фазе дифференциального сигнала катушек и максимуму модуля реальной части распределения осевой составляющей магнитного поля для центрального кольца датчиков. Моделирование показало, что именно эта величина достаточно чувствительна к изменению глубины несплошности.

Также стоит отметить, что, выбирая иные распределения, например, реальную часть радиальной составляющей магнитного поля для центрального кольца, можно определять не только глубину дефекта, но и его протяженность по расстоянию между максимумами сигнала.

ВИХРЕТОКОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Гудков С.А., Кудрявцев И.А.

СГАУ им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам разработки новых средств электромагнитной диагностики гидравлических систем технологического оборудования, а также авиационной и космической техники.

Вихретоковый метод (ВТМ) контроля чистоты жидкостей является одним из перспективных, так как позволяет осуществлять многопараметрический контроль без контакта преобразователя и объекта, что позволяет получать хорошие результаты при высоких скоростях движения объектов. Основным достоинством ВТМ является возможность определять материал примесных металлочастиц (ферромагнитный или неферромагнитный). Однако существующие приборы контроля параметров дисперсной фазы на основе вихретокового метода (АЗЖ-907) не обладают требуемыми для диагностики современных агрегатов гидравлических систем параметрами. Для повышения чувствительности вихретокового датчика предлагается применение проходного вихретокового преобразователя (ВТП) с несколькими обмотками, позволяющего реализовать метод синхронного накопления. Каждая из обмоток представляет собой комплекс из четырех печатных катушек. На рис. 1 упрощенно приведена конструкция разработанного ВТП.

Поток анализируемой жидкости прокачивается по измерительному каналу датчика. Зная скорость течения жидкости и фиксируя момент прохождения частицей обмотки I , возможно организовать синхронное накопление сигнала, наводимого металлочастицей в измерительных катушках

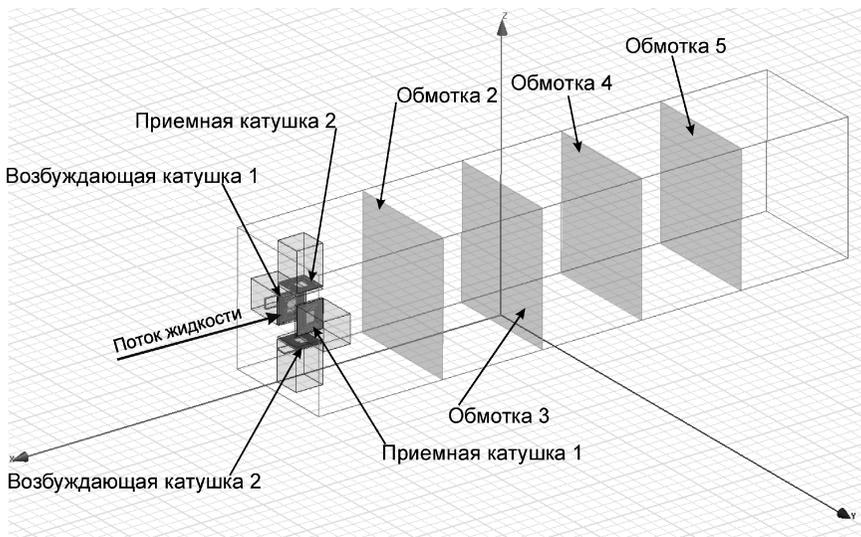


Рис. 1. Конструкция ВТП для контроля параметров дисперсной фазы

датчика при ее движении по чувствительному объему ВТП. При этом соотношение сигнал/шум на выходе ВТП повышается прямо пропорционально количеству обмоток. В докладе подробно рассматривается анализ предлагаемого датчика с помощью специализированного САПР конечно-элементного моделирования.

Анализируя реактивную и активную составляющие вносимого напряжения, можно различать материал частиц загрязнений по обобщенному параметру $\mu\sigma$, где μ – относительная магнитная проницаемость материала частицы, σ – электропроводность материала частицы.

При этом количество обмоток датчика ограничивается допустимым продольным размером ВТП и технологическими соображениями, так как при движении примесной частицы по каналу ВТП возможны флуктуации ее положения внутри ВТП, затрудняющие реализацию метода синхронного накопления.

Применение предлагаемого ВТП позволит осуществлять гранулометрический анализ механических примесей в рабочей жидкости, а также получать дополнительную информацию о материале частицы, что, в свою очередь, позволит локализовать узел-источник частиц износа.

ПРИМЕНЕНИЕ ВТ МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ

Гребеньков П.М., Яцков М.В., Чегодаев В.В.
ООО «РДМ-контакт», Москва, Россия

Доклад затрагивает проблемы, связанные с диагностикой состояния железнодорожных рельсов. Постоянно повышаемые требования к пропускной способности железных дорог влечет за собой высокие требования к состоянию элементов верхнего строения пути, в частности рабочей поверхности головки рельсов. По данным ОАО «РЖД», более 40 % всех выявляемых критических дефектов рельсов возникает вследствие развития поверхностных трещин, вызванных контактной усталостью качения в головке рельсов. Основным методом профилактики, позволяющим снизить количество изломов рельсов, вызванных контактной усталостью качения, является шлифовка рельсов [1]. Однако, для разработки эффективных и экономически целесообразных стратегий шлифовки головки рельсов необходимо иметь возможность оценки геометрических параметров поверхностных дефектов, возникающих в этой области. Решение этой задачи осложняется тем обстоятельством, что дефекты, вызванные контактной усталостью качения, в силу особенностей взаимодействия колеса и рельса, распространяются под углом $15...30^\circ$ к поверхности катания. Применяемые в настоящее время на Российских, а также зарубежных железных дорогах ультразвуковые и магнитные методы контроля не в состоянии решить данную задачу [2]. В данной работе рассмотрена возможность применения ВТ метода НК на основе многоэлементного преобразователя для обнаружения контактно-усталостных трещин на рабочей поверхности головки рельсов. Приведены результаты математического моделирования взаимодействия одноэлементного преобразователя с рабочей поверхностью головки рельса. Показаны результаты экспериментального исследования макета многоэлементного ВТ преобразователя.

Литература

1. **Немпе Т., Сiefert Т.** Rail Engineering International, 2007, № 3. P. 6 – 12.
2. **Гребеньков П.М., Яцков М.В., Чегодаев В.В.** Проблема выявления и оценки геометрических характеристик контактно-усталостных трещин в рабочих поверхностях головки рельсов, тезисы докладов V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 2011. С. 56.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Федосенко Ю.К.

ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

В докладе излагаются методы повышения достоверности автоматизированного вихретокового контроля труб, проката, проволоки как в процессе производства этой металлопродукции, так при входном контроле на предприятиях машиностроения. С помощью электромагнитных дефектоскопов контролируется почти 100 % тонкой проволоки $\varnothing 0,05 \dots 2,5$ м (дефектоскопы с проходными ВТП); ~ 90 % труб м проката некруглой формы (прямоугольной, шестигранной, квадратной); ~ 80 % электросварных труб в потоке непрерывной трубы электросварочных агрегатов. В связи с тем, что требования к дефектоскопическому контролю постоянно возрастают, совершенствование средств контроля требует новых методов. Применительно к контролю проходными ВТП эти методы направлены на решение

таких задач как: повышение соотношения сигнал/шум ($K = \frac{U_B}{U_{ш}}$, что осо-

бенно важно при относительно больших диаметрах труб (~ $\varnothing 100 \dots 220$ мм)), повышение помехозащищенности измерительного тракта, расширение функциональных возможностей дефектоскопа (например, помимо дефектоскопического канала, введение канала толщинометрии). Для повышения соотношения сигнал/шум как основного показателя, влияющего на достоверность контроля используются два метода: в первом водится дополнительный шумоподавляющий канал, для которого в качестве источника сигналов используется дополнительная дифференциальная пара измерительных обмоток с диаметром, превышающим диаметр основной измерительной обмотки ($\varnothing D_{доп} \gg D_{осн}$). Сигналы от шума, наводящиеся в обеих обмотках, выравниваются и вычитаются на сумматоре, а сигнал от дефектов выделяются для дальнейшей обработки.

Удается выделять сигналы от дефектов, сигнал от которых значительно меньше сигнала от шума ($K \ll 1$), во втором способе используется конструкция проходного ВТП с угловой асимметрией электромагнитного поля, которая достигается за счет металлического (например, медного) экрана с четырьмя вырезами, разнесенными по длине преобразователя. Повышение чувствительности к продольным дефектам с плавными заходными зонами достигается за счет применения преобразователей комбинированного типа: проходных и накладных вращающихся. Для отстройки от импульсных помех вводится дополнительный измерительный канал, сигналы в который

поступают с дополнительной измерительной обмотки ВТП, смещенной вдоль продольной оси преобразователя на заданное расстояние l . Сигналы от помех возникают в обоих каналах одновременно, а сигналы от дефекта последовательно с временной задержкой $\Delta t = \frac{l}{v}$, учитываемой программно (где l – смещение обмоток, v – скорость контроля). Для построения дополнительного канала измерения толщины стенки трубы используется уже введенное в дефектоскоп продольное постоянное магнитное поле и набор размещенных по периметру трубы, например датчиков Холла, каждый из которых измеряет продольную составляющую постоянного магнитного поля в заданной точке периметра.

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ТРЕЩИН В СТЕНКАХ ОТВЕРСТИЙ

Дидин Г.А.¹, Шкатов П.Н.², Ездаков В.А.³

¹ООО «ГлавДиагностика», Москва, Россия

²НУЦ «Каскад» при МГУПИ, Москва, Россия

³«ФГУП» «Салют», Москва, Россия

Доклад посвящен вопросу выявления продольных трещин в стенках цилиндрических отверстий в пластинах из жаропрочных сталей, применяемых в авиационных двигателях. Трещины, как правило, развиваются с выходом на одну из сторон пластин. Проходные вихретоковые преобразователи (ВТП) не обеспечивают надежной регистрации недопустимых дефектов из-за интегрального характера получаемой информации и сильного влияния краевого эффекта. Используемые для решения подобной задачи дефектоскопы с вращающимся накладным ВТП достаточно сложны и дорогостоящи. Вместе с тем и они не могут быть использованы в данном случае из-за габаритных ограничений – максимально допустимый диаметр средства доставки 10 мм при диаметре контролируемого отверстия 5 мм.

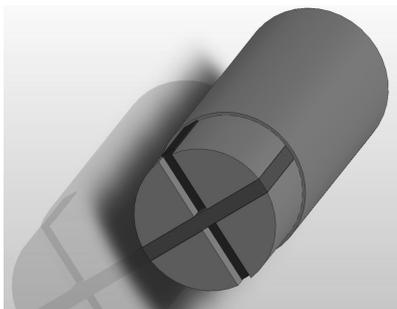


Рис. 1

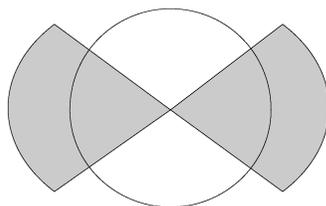


Рис. 2

Для выявления опасных дефектов с необходимой чувствительностью при одновременном подавлении краевого эффекта был разработан специальный вихретоковый преобразователь, изображенный на рис. 1. Он имеет ортогональные возбуждающую и измерительную обмотки, защищенные от механических повреждений титановым колпачком.

При отсутствии дефектов напряжение, наводимое в измерительной обмотке, близко к нулю. Под влиянием продольной трещины происходит деформация контуров вихревых токов, имеющих не только осевую, но и угловую составляющие за счет конечной толщины пластины. При этом надежно регистрируются дефекты в угловом секторе $2 \times 60^\circ$ (рис. 2). Это позволило полностью отказаться от вращения чувствительного элемента, так как зона вероятного возникновения трещин не превышает данный сектор. Для оптимизации настройки разработанного ВТП в процессе изготовления и повышения чувствительности к трещинам малого размера измерительная обмотка выполнена из двух секций, включенных особым образом (патент РФ № 2216729).

Для более полной реализации возможностей ВТП был разработан электронный блок, сочетающий повышенную точность измерения сигнала, оригинальный алгоритм его обработки и малое энергопотребление, что особенно важно при работе в полевых условиях.

Получившийся в результате дефектоскоп «Салют-1» позволяет выявлять трещины в цилиндрических отверстиях диаметром 4,8...5,4мм, расположенных в труднодоступных местах сложных механизмов. Прибор не допускает ложных срабатываний при перекосе ВТП, а также при несоосном расположении ВТП и контролируемого отверстия.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КЛАСТЕРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

Меркулов А.И., Валиулина И.Р., Лавров А.Ю.

СГАУ им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

Круг задач, решаемых с привлечением усталостных испытаний весьма широк: изучение закономерностей сопротивления усталости, кинетика разрушений материалов в зависимости от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Определение глубины и длины поверхностной трещины в процессе испытаний – одна из важнейших задач дефектометрии при исследовании сопротивления материалов циклическому разрушению. Вибрации объекта контроля (ОК) и наличие концентраторов напряжений определяют работу преобразователей при повышенных

зазорах безопасности, а близость металлических элементов испытательной машины требует экранирования электромагнитных полей для их локализации и работы в труднодоступных зонах ОК.

В последние годы проводятся широкие исследования по выбору количества, пространственной ориентации и взаимных связей полей токовых катушек, определяющих конструктивную топологию многоэлементных электромагнитных преобразователей (кластеров – КП), позволяющих при электронном сканировании увеличить площадь зоны контроля и сохранить чувствительность и разрешающую способность вихретокового метода [1]. Целесообразна идентификация пространственных характеристик различных типов преобразователей при компоновке конструктивной топологии КП.

Для накладных преобразователей (ПНК – ось возбуждающей катушки перпендикулярна поверхности ОК) диаметр D_k катушек намного больше высоты d_k намотки проводников. Представление ОК эквивалентным витком с максимальной плотностью русла вихревых токов диаметром D_v является достаточно строгим и универсальным [2]. У ПНК $D_v = D_k + 1,5h$, где h – зазор между ОК и ПНК. Установка ПНК на металлический экран приводит к полной компенсации возбуждающего магнитного поля полем вихревых токов экрана, что затрудняет использование ПНК в труднодоступной зоне. Кроме того при больших h необходимы повышенные D_k , что ухудшает разрешающую способность ПНК. Так в работе [3] разработан кластер ПНК с катушками, намотанными на ферритовые стержни малого D_k , что исключает работу с повышенными h .

Этого недостатка лишен ортогональный ПНО (ось катушки параллельна поверхности ОК). Проводники катушки наматываются на пластинчатый магнитопровод малой толщины ($d_m = D_k$). Длина l_m магнитопровода больше его ширины b_m . D_v определяется l_m , а $b_m > d_m$ характеризует согласование конфигурации концентратора напряжения с топологией возбуждающего поля ПНО [4]. При установке ПНО на экран электромагнитное поле локализуется в зоне контроля между ОК и ПНО, что исключает мешающие взаимодействия полей с внешними объектами и позволяет рассматривать рабочую часть ПНО в виде набора линейных отрезков проводников – токовых элементов (ТЭ), задающих направление русла вихревых токов.

Для выявления усталостной трещины с высокой чувствительностью над ОК формируем кластер ПНО с ортогональным размещением ТЭ относительно оси концентратора механических напряжений, задающей направление развития усталостной трещины. При линейной компоновке КП средний ПНО размещается над концентратором ОК и вертикальный зазор h_z между ним и вершиной трещины ОК будет складываться из установочного d_y и начального h_n зазоров, глубины концентратора d_k и трещины d_{mp} : $h_z = d_y + h_n + d_k + d_{mp}$. Даже одиночный ТЭ наводит сложное восьмеркообразное русло вихревых токов. Разработаны новые методы численных расчетов выходных характеристик КП. Полученные теоретические харак-

теристики были проверены на специально разработанном лабораторном стенде.

Перед началом испытаний на усталость необходимо снять градуировочные характеристики на экспериментальном стенде. Все ПНО кластера расположены на поверхности единого металлического корпуса, имеющего высокую теплопроводность, поэтому окружающая температура оказывает на них одинаковое воздействие и результат дифференциального измерения $d_{\text{тр изм}}$ не зависит от температуры.

Таким образом, проведенная идентификация ПНК и ПНО и компоновка кластеров ПНО позволила:

- реализовать пространственную селекцию контролируемых и подавление влияния мешающих факторов;
- получить требуемые начальные параметры ПНО кластера: индуктивность и эквивалентный диаметр, – позволяющие проводить контроля при повышенных зазорах в труднодоступных зонах;
- задавать направление и конфигурацию русла вихревых токов для определения глубины и длины усталостной трещины с высокой чувствительностью.

Литература

1. **Федосенко Ю.К.** Секция 1.2 Электромагнитные методы. // Контроль. Диагностика. 2010. – № 8. – Москва, 10th ECNDT. С. 18.

2. **Шкарлет Ю.М.** Общие и частные закономерности теории вихретокового контроля // Дефектоскопия. 1991. № 4. С. 71 – 76.

3. **Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.:** Electromagnetic imaging using probe arrays. 17th World Conference on Non-destructive Testing, paper 380, Shanghai, Oct. 25-28, 2008.

4. **Меркулов А.И., Валиулина И.Р.** и др. Электромагнитные преобразователи для контроля усталостных трещин проводящих объектов с концентраторами напряжений. Материалы 16 Международной НТК «ЛЕО-ТЕСТ–2011», с. Славське Львовской обл.

УНИВЕРСАЛЬНОЕ ВИХРЕТОКОВОЕ УСТРОЙСТВО С ИНТЕРФЕЙСОМ USB

Покровский А.Д., Хвостов А.А.
*Московский энергетический институт (ТУ),
Москва, Россия*

Доклад посвящен вопросам разработки универсальных вихретоковых приборов, позволяющих решать широкий спектр задач вихретоковых методов неразрушающего контроля.

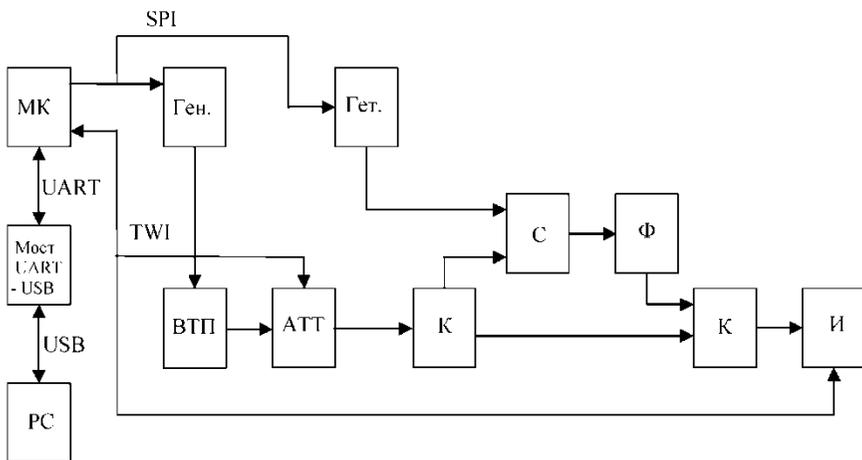


Рис. 1. Структурная схема

Устройство должно быть простым в эксплуатации и подключаться к PC по интерфейсу USB.

Оно не должно иметь дополнительных источников питания и органов управления и должно быть снабжено базовым программным обеспечением, позволяющим, устанавливать рабочую частоту вихретокового преобразователя, величину усиления в измерительном тракте и наблюдать сигналы вихретокового преобразователя на экране PC в режиме «комплексная плоскость».

Единственный доступный способ, позволяющий создавать столь широкополосные устройства – это преобразование частоты. В этом случае измерительный тракт получается достаточно узкополосным, а измерения на частотах, выходящих за его полосу, осуществляются на промежуточной частоте.

Использование прямого усиления на низких частотах и преобразования частоты на высоких частотах определяет структуру измерительного тракта разрабатываемого вихретокового устройства.

На рис. 1 использованы следующие обозначения:

Ген. – генератор синусоидального напряжения рабочей частоты; Гет. – генератор прямоугольных импульсов вспомогательной частоты; ВТП – вихретоковый преобразователь;

АТТ – аттенуатор; К – коммутаторы сигналов; С – смеситель; Ф – фильтр промежуточной частоты; И – измеритель комплексного напряжения; МК – микроконтроллер; Мост UART – USB – преобразователь интерфейса; PC – персональный компьютер.

На низкой частоте с помощью коммутаторов схема заметно упрощается. В данном случае не используется фильтр и смеситель, а устройство работает без преобразования частоты в режиме прямого усиления сигнала.

При работе в высокочастотном режиме схема существенно сложнее, т.к. приходится использовать преобразование частоты, используя смеситель и фильтр. Усложнение схемы немного ухудшает характеристики, но зато позволяет работать на высокой частоте вплоть до 5 МГц.

Для управления устройством используется микроконтроллер [1]. Микроконтроллеры с USB, как правило, – избыточны, а у базовых моделей – его нет, и для экономии средств, микроконтроллер подключается к компьютеру через мост USB-UART [2]. Для связи с компьютером был выбран интерфейс USB [3], так как в настоящее время это самый распространенный и достаточно быстрый интерфейс для работы с внешними устройствами. Мост обеспечивает обмен данными между компьютером и микроконтроллером через виртуальный COM-порт.

Микроконтроллер необходим для синхронизации работы всех устройств. Например, измеритель комплексного напряжения имеет интерфейс TWI, генератор – интерфейс SPI, с мостом связь идет через интерфейс UART. Поскольку используемые устройства имеют разнообразные интерфейсы связи, необходим микроконтроллер, который имеет все эти интерфейсы и может управлять всеми необходимыми устройствами.

С компьютера пересылаются такие параметры как усиление и частота в микроконтроллер, который в свою очередь, производит соответствующие установки в схеме, используя встроенные интерфейсы или прямое управление. Микроконтроллер устанавливает в генераторе необходимую частоту. Генератор питает вихретоковый преобразователь. В зависимости от выбранной частоты микроконтроллер с помощью коммутаторов подключает фильтры, гетеродин и синтезаторы к схеме или отключает их. В случае если они отключены, сигналы напряжения и тока с вихретокового преобразователя попадают на аттенюатор, а затем сразу же попадают на измеритель комплексного напряжения.

Если ведется преобразование частоты – синтезаторы и фильтры подключены. В таком случае сигнал с аттенюатора попадает на смеситель вместе с сигналом гетеродина, производится их перемножение, затем уже сигнал через фильтр попадает на измеритель. Микроконтроллер получает данные о сигнале ВТП с измерителя, производит первичную обработку и пересылает их в компьютер.

Время одного измерения составляет порядка миллисекунды на высоких частотах, но может достигать величины 18 мс на частоте 200 Гц.

Программа для компьютера реализована на языке программирования Delphi. Она предназначена, для управления устройством, его настройкой, а так же обработки и наглядного представления результатов всех измерений и расчетов.

В основном окне программы расположены ползунки для регулировки усиления и частоты. Они дублируются кнопками точной подстройки, расположенными справа от регулируемых величин. Усиление регулируется в диапазоне от 0 дБ до 48 дБ. Частота регулируется в диапазоне от 200 Гц до 5 МГц. На этой же панели расположены индикаторы выхода за границы динамического диапазона по току и напряжению, которые позволяют подобрать правильный коэффициент усиления, для работы на конкретном объекте. Слева на этой панели находится регулировка угла поворота комплексной плоскости, для того чтобы можно было повернуть годографы до более удобного для работы состояния. На панели «Годографы» располагается комплексная плоскость, на которой отображаются годографы сигналов вихретокового преобразователя.

Литература

1. **Евстифеев А.В.** Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007 – 592 с.:ил (Серия «Программируемые системы»). С. 24 – 27.
2. <http://www.silabs.com/products/interface/usbtouart/Pages/usb-to-uart-bridge.aspx>
3. http://ru.wikipedia.org/wiki/USB#USB_2.0

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ КОНТРОЛИРУЕМОГО УЧАСТКА НА РЕГИСТРИРУЕМЫЕ СИГНАЛЫ ПРИ ВИХРЕТОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Шкатов П.Н., Колосков Д.В.

НУЦ «КАСКАД» при МГУПИ, Москва, Россия

Значительная часть обследуемой с помощью накладных вихретоковых преобразователей (ВТП) поверхности отличается от плоской и может быть представлена в виде цилиндрической. Это имеет место при контроле валов, галтельных переходов, шпилек и других высоконагруженных элементов оборудования ответственного назначения. Влияние кривизны поверхности может оказывать существенное влияние на величину регистрируемых сигналов при различных способах вихретоковой дефектоскопии. Вместе с тем количественная оценка влияния кривизны вогнутых и выпуклых участков на параметры сигналов, связанных с дефектами, по имеющимся у нас данным, не проводилась.

Соответствующие исследования проводились путем математического моделирования методом конечных элементов. При расчетах рассматривались ВТП как с ферромагнитными сердечниками различной конструкции, так и без них.

Проведено обобщение полученных результатов, позволяющее свести влияние кривизны контролируемой поверхности к эквивалентному изменению параметров при взаимодействии ВТП с плоским объектом. Это позволяет оценить изменение чувствительности к дефектам на криволинейных участках без использования дополнительных образцов, а также ввести соответствующую поправку при дефектометрической оценке дефектов, выявленных на криволинейном участке.

ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ВИХРЕТОВОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ

Шкатов П.Н., Куценко Д.О.

НУЦ «КАСКАД» при МГУПИ, Москва, Россия

Для оценки технического состояния металлических объектов широко применяется вихретоковый метод неразрушающего контроля. Основная область применения вихретокового метода – выявление поверхностных трещин. Эффективность вихретоковой дефектоскопии в значительной степени определяется вихретоковым преобразователем (ВТП). Несмотря на это в существующей нормативной документации не прописаны метрологические характеристики ВТП и процедуры их получения. Вместе с тем в других видах контроля, в частности, в ультразвуковом, разработаны и жестко контролируются требования к параметрам пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) [1–2], разработаны методы и средства их поверки и испытаний [3]. За счет этого в ультразвуковой аппаратуре достигнута взаимозаменяемость типовых (ПЭП), по единым методикам проводится измерение параметров ПЭП и их контроль на стадии изготовления экспериментальных, опытных и серийных образцов, входной проверки и периодической проверки в процессе эксплуатации.

Данная работа направлена на создание подобной системы применительно к вихретоковому контролю. Первый шаг в данном направлении состоит в выборе основных параметров, определяющих качество ВТП и разработке методик их измерения. Исследование выходных характеристик ВТП различной конструкции проводилось при помощи программно-аппаратного комплекса на «КОМВИС ЛМ». Для получения соответствующей

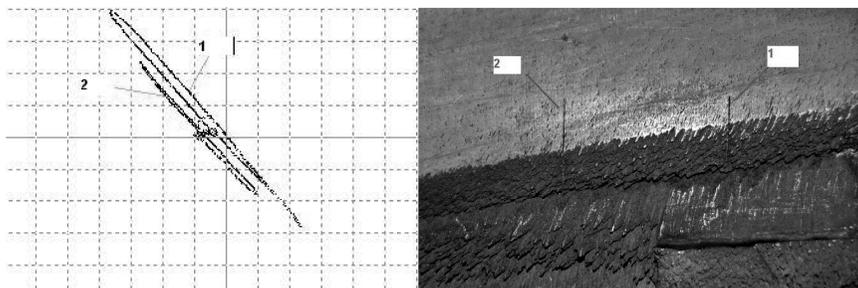


Рис. 1. Форма годографов на комплексной плоскости при сканировании образца с различной шероховатостью поверхности

ших зависимостей также применялась сканирующая система и комплект контрольных образцов с различными дефектами, выполненными электроэрозионным способом.

Сканирующая система позволяла перемещать рабочий торец ВТП с различным рабочим зазором и углом наклона. Контрольные образцы выполнялись как из ферромагнитных (черных), так и цветных металлов и имели различную шероховатость поверхности, одиночные дефекты, дефекты, выполненные в сходящихся друг к другу плоскостях.

В процессе исследования были получены импульсы амплитуды и изменения фазы сигналов при сканировании дефектных участков с различным рабочим зазором и углом наклона оси ВТП в диапазоне частот, а также соответствующие годографы на комплексной плоскости (рис. 1).

Литература

1. ГОСТ 23702–90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний.
2. ГОСТ 26266–90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие требования.
3. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С. Автоматизированная система для измерения параметров ультразвуковых преобразователей // В мире неразрушающего контроля. № 1 (47). 2010.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ Nb_3Sn ДЛЯ ИТЭР ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Шкатов П.Н., Фигуровский Д.К., Петелин А., Тронза В.И.

НУЦ «КАСКАД» при МГУПИ, Москва, Россия

В магнитных системах Интернационального термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) используются сверхпроводники на основе биметаллического соединения Nb_3Sn , за счет взаимодействия олова из бронзовой матрицы с ниобиевыми волокнами.

Сверхпроводник имеет внешний диаметр 0,82 мм и представляет собой сложный композиционный материал (рис. 1), в состав которого входят сверхпроводящие волокна, бронзовая матрица, сплошной ниобиевый и танталовый диффузионный барьер и стабилизирующая медь.

К сверхпроводникам предъявляется ряд жестких технических требований, в том числе по отношению $k_{Cu} = S_{\text{меди}}/S_{\text{не меди}}$ меди и отсутствию дефектов в медной стабилизирующей оболочке. Дефекты могут иметь вид включений, сколов, трещин, закатов.

Номинальная величина k_{Cu} составляет 50 % при допуске $\pm 2,5$ %. Максимальный размер дефекта в медной оболочке не должен превышать 100 мкм в радиальном направлении и 300 мкм в осевом. Для обеспечения данных требований в МГУПИ была разработана двухканальная вихретоковая система. Она состоит из блока проходного вихретокового преобразователя (ВТП) с встроенным электронным модулем и ПК, подключаемого через

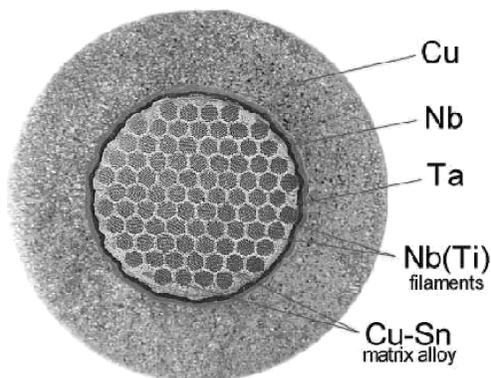


Рис. 1. Поперечный срез Nb_3Sn сверхпроводника

высокоскоростной АЦП. ВТП имеет соленоидальную возбуждающую катушку, измерительную катушку абсолютного канала и дифференциально включенные измерительные катушки дефектоскопического канала. Конструкция блока ВТП обеспечивает стабильность компенсации в течение длительного времени (не менее 8 часов). Проведенные испытания показали возможность непрерывного контроля качества проволоки по заданным критериям в производственном потоке.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ РЕЗИНОПОДОБНОГО ПОКРЫТИЯ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Фоменко А.И., Юхацкова О.В., Муханов Е.Е., Гульбис М.А.

*ОАО «ЦНИИ специального машиностроения»
г. Хотьково Московской области, Россия*

Измерение толщины покрытий – важная часть неразрушающего контроля.

Для придания материалам свойств, которые они заведомо не имеют, широко распространено применение различного рода покрытий. Функции, которые несут покрытия, крайне разнообразны: это и электроизоляционные, и антикоррозийные, теплозащитные, жаропрочные, ударопрочные и другие. К тому же огромное количество разного рода покрытий применяется для придания эстетических свойств поверхности, для декоративной отделки. Но где бы ни применялись покрытия, важнейшим показателем качества является толщина. Если толщина меньше необходимой, то покрытие не будет выполнять назначаемых ему свойств. Если толщина больше, то имеет место перерасход материала, и во многих случаях снижение механических свойств покрытия. Измерениям толщины – толщинометрии – отведено значительное внимание в области неразрушающего контроля.

В настоящее время приборов, осуществляющих неразрушающие или бесконтактные измерения толщины, существует огромное множество. Такие приборы называются толщиномерами. Вариантов их реализации много – от механических магнитоотрывных и небольших автономных толщиномеров краски автомобиля до целых систем автоматизированного контроля толщины покрытия в производстве. Чтобы правильно выбрать метод измерения, нужно знать материал основания, материал покрытия, диапазон измерений и требуемую точность. Основные методы таких измерений – это ультразвуковой, магнитный и вихретоковый. Также существуют комбинированные методы, но в целом они не отличаются от перечисленных.

Ультразвуковой метод является самым универсальным, но для его осуществления необходимо знать скорость распространения ультразвука в материалах измеряемых слоев. Такие толщиномеры могут работать либо в импульсном, либо в непрерывном режимах измерения, иногда конструкция позволяет работать в обоих режимах на одном приборе. Импульсный режим работает по принципу «импульс-эхо»: излучатель генерирует короткий импульс (обычно от 0,5 до 100 МГц), который сообщается поверхности, и сразу же переходит в режим приемника. Ультразвуковой импульс отражается от каждой границы плотностей материала и возвращается в приемник. Измеряется время между излучением и последующими возвращениями импульсов, и, зная скорость распространения ультразвука в материале, вычисляется толщина по формуле

$$\frac{\Delta t_1}{2} v_1 + \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2} v_2 + \dots + \frac{\Delta t_n - \Delta t_{n-1}}{2} v_n, \quad (1)$$

где Δt_n – время между излучением и отражением от конца n -го слоя; v_n – скорость распространения ультразвука в n -ом слое.

Такой режим позволяет производить измерение толщины нескольких слоев.

Непрерывный режим подразумевает работающие рядом излучатель и приемник, толщина слоя определяется по фазовому сдвигу отраженного сигнала относительно излучаемого.

Недостатком ультразвукового метода измерений является то, что на практике его удается применять при толщинах менее 500 мкм, к тому же измеряемый материал должен быть однородным.

В случае, когда покрытие нанесено на металлическую поверхность, применяют обычно электромагнитные или вихретоковые методы измерений. Толщина немагнитных покрытий на стали может быть измерена магнитными толщиномерами. Их можно разделить на магнитоотрывные и индукционные. Работа магнитоотрывных толщиномеров основана на измерении силы отрыва постоянного магнита от объекта контроля. Такие толщиномеры просты и не требуют источника питания. Измеряются толщины до 20 мм при погрешности измерения от 5 % до 10 %.

Действие индукционных толщиномеров основано на влиянии толщины покрытия на магнитное сопротивление магнитной цепи основание-покрытие-датчик. Достоинства этих приборов – широкий диапазон измерений (до 50 мм), низкая погрешность измерений (2...3 %).

Вихретоковый метод контроля представляет собой анализ взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этим полем возбуждающей катушкой в электропроводящем слое, на который нанесено измеряемое покрытие. В качестве ис-

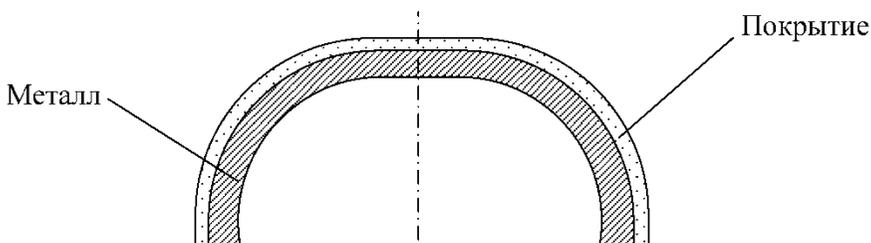
точника электромагнитного поля чаще всего используется индуктивная катушка (одна или несколько), называемая вихретоковым преобразователем. Синусоидальный (или импульсный) ток, действующий в катушках, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электромагнитном основании. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на катушках или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно него.

Отработка методики измерения толщины резиноподобного покрытия

На данный момент стоит задача отработки методики измерения толщины резиноподобного покрытия на металлической подложке. Измерения проводятся вихретоковым методом на стадии изготовления покрытия, доработки поверхности и установки в корпус.

При создании технологии измерения толщины резиноподобного покрытия стоят две противоречивые задачи. С одной стороны необходимо провести контроль с максимальной производительностью и минимальной трудоемкостью. С другой стороны – обеспечить и максимальную точность замеров при условии того, что толщина резины и металлической подложки конструктивно изменяются, что приводит к необходимости многократной перенастройки прибора.

Поэтому одной из главных задач, решаемых в настоящей работе, является выбор кластеров поверхности максимальной площади, на которых прибор не требует перенастройки.



**Рис. 1. Схема расположения резиноподобного покрытия
на металлическом основании**

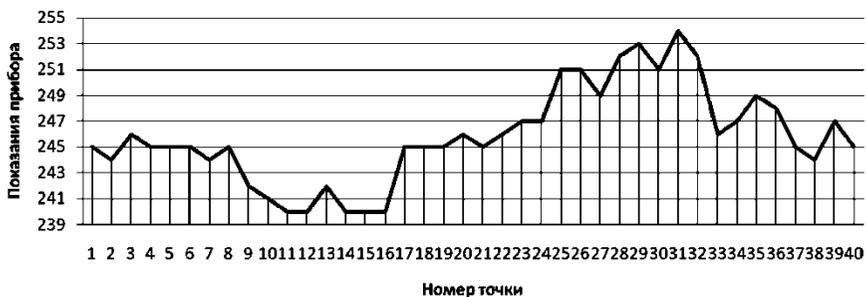


Рис. 2. Показания прибора при одинаковой толщине измеряемого слоя

Для определения электропроводящих свойств подложки используют эталонные меры, замеряя показания на поверхности основания в строго определенных точках. Этим точек может быть от семидесяти до двухсот, в зависимости от величины покрытия. Производится двадцать один замер в разное время разными исполнителями для получения статистических данных о погрешности прибора и электропроводности подложки в точках. Из рис. 2 видно, что электропроводящие свойства металла в различных местах меняются. Анализируя полученные статистические данные, точки со схожими показаниями объединяют в группы.

Для каждой объединенной группы строится градуировочная кривая.

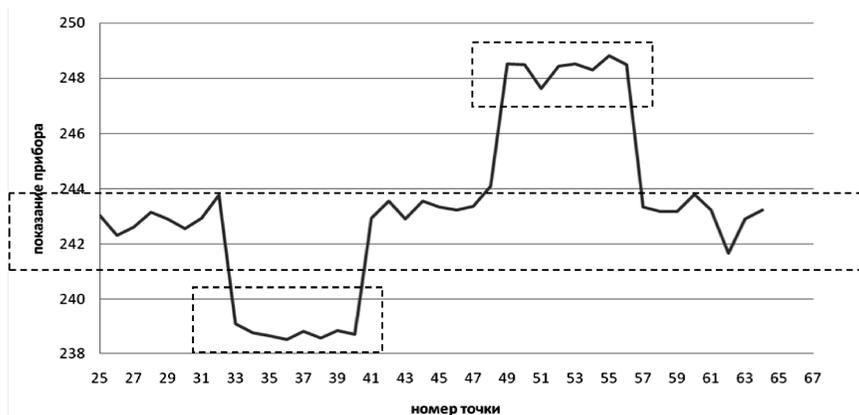


Рис. 3. Объединение точек в группы

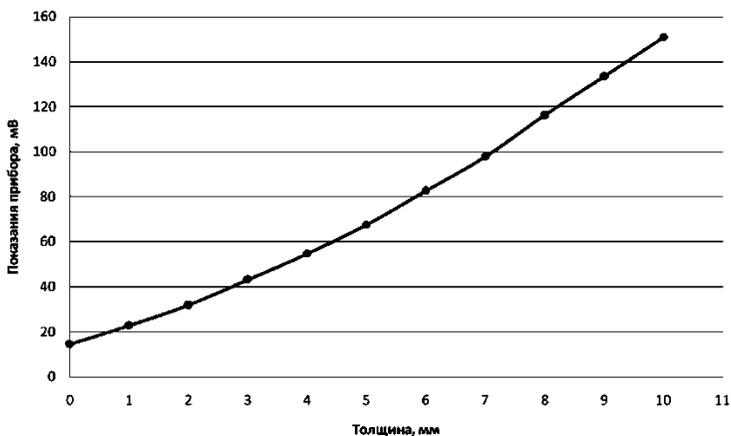


Рис. 4. Пример построения градуировочной кривой

После изготовления покрытия, в соответствии с требованиями КД на наружную поверхность резиноподобного покрытия наносится разметка точек контроля толщины. записываются показания прибора в выбранных заранее точках, затем высчитывается толщина по градуировочной характеристике. В случае несоответствия нормам изделие отправляется на доработку.

После изготовления покрытие помещается в основание, не проводящее электрический ток. При этом для замера толщины покрытия, между ним и основание наклеиваются токопроводящие элементы прокладываются металлические кольца, с помощью которых определяется толщина.

Кольца являются металлическим основанием, с помощью которого возможно осуществление измерений вихретоковым методом.

Однако существующая методика имеет множество серьезных недостатков. Во-первых, измерения проводятся приборами 1960-го года выпуска, которые необходимо настраивать заново практически после каждого замера. К тому же эти приборы громоздки и требуют работы минимум двух человек.

Во-вторых, на данный момент градуировочная характеристика строится вручную на миллиметровой бумаге, в результате чего появляется погрешность, хотя современное программное обеспечение позволяет строить градуировочные кривые с высокой точностью.

В-третьих, токопроводящие кольца, устанавливаемые между покрытием и корпусом, смещаются на значительное расстояние от заданных точек, что сильно усложняет поиск этих колец под покрытием.

В-четвертых, само покрытие обладает слабой электропроводностью, которая в настоящее время не учитывается при измерениях, и природу которой следует изучить.

В совокупности эти проблемы дают серьезные отклонения показаний. Это и методические, и инструментальные погрешности.

Отчасти решение проблем возможно с применением современных вихретоковых толщиномеров, но задачу усложняет то, что диапазон измеряемой толщины – 0..30мм. На таком диапазоне толщин возникает большая погрешность, вызванная особенностями вихретокового метода измерений. Также необходимо внедрение современных компьютерных технологий для построения градуировочных характеристик для снижения погрешности аппроксимации.

Выводы

Таким образом, разработана и отработана технология измерения толщины резиноподобного покрытия на неоднородной токопроводящей металлической подложке вихретоковым методом.

АНАЛИЗ ПРИЗНАКОВ ВИХРЕТОКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Барабанов П.А., Лунин В.П.
*ГОУ ВПО «Московский энергетический институт
(технический университет), Москва, Россия*

Доклад посвящен проблеме автоматизации процесса обработки вихретоковых сигналов. Теплообменные трубы парогенераторов являются границей между первым и вторым контурами атомных электростанций, и в связи с этим, играют важную роль в их безопасной эксплуатации. Поэтому достоверная оценка целостности труб парогенераторов является очень важной задачей неразрушающего контроля.

Контроль труб проводится внутренним проходным вихретоковым преобразователем, при этом используется как абсолютный, так и дифференциальный режим его работы. Достоверная оценка геометрических параметров обнаруженных дефектов представляет собой сложную задачу даже для хорошо подготовленного специалиста-эксперта. Поэтому создание автоматизированных систем анализа вихретоковых сигналов и оценки геометрических параметров дефектов является актуальной и перспективной задачей.

Чтобы построить подобную систему, необходимо иметь базу вихретоковых сигналов от дефектов с известными геометрическими параметрами и формой. Для этого в работе с помощью конечно-элементного моделирования процедуры контроля были получены дифференциальные сигналы в виде комплексных сопротивлений (рис. 1) от 100 дефектов разной формы (прямоугольной, трапециевидной и V-образной), но с одинаковыми глубиной и протяженностью для четырех частот (25, 50, 100 и 400кГц).

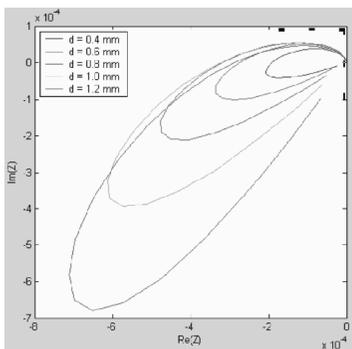


Рис. 1. Годографы комплексного сопротивления ВТП

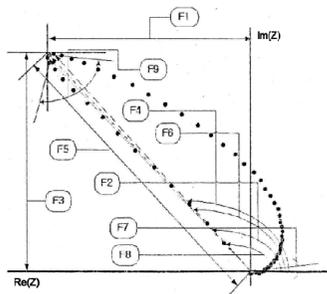


Рис. 2. Информативные параметры сигнала

Для решения задачи классификации дефектов по форме и для оценки их геометрических параметров в каждом из сигналов были выделены 11 информативных параметров-признаков, таких как максимальное активное сопротивление, максимальное реактивное сопротивление, максимальное полное сопротивление, максимальные и начальные фазовые углы и другие. По признакам базы модельных сигналов была обучена простая нейронная сеть в виде персептрона, которая в процессе тестирования дала удовлетворительные результаты и для сигналов, не входивших в обучающую выборку.

Но в связи с тем, что в двумерной модели невозможно реализовать дефекты конечной длины, было принято решение о создании новой базы сигналов с использованием трехмерной модели. Также при использовании трехмерной модели появляется возможность исследования влияния на сигнал ориентации дефектов относительно оси трубы и мешающих факторов, например, отклонение датчика от оси трубы и другие. Работа над созданием новой базы сигналов в настоящий момент продолжается.

Таким образом, было показано, что, имея базу сигналов от различных дефектов и выбирая информативные признаки этих сигналов, можно создать автоматизированную систему на основе нейронной сети, способную классифицировать и определять параметры дефектов по этим признакам. Создание и совершенствование такой системы для всех возможных форм дефектов может существенно упростить процедуру оценки результатов контроля состояния труб парогенераторов.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ СКАНЕР-ДЕФЕКТОСКОП «ВИХРЬ» ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Коннов В.В., Кузнецов А.М., Коннов Вл.Вл., Коннов А.В.
ЗАО НПЦ «Молния», Москва, Россия

СЕКЦИЯ 4. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКОЙ

Воронков И.В.

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия

В докладе предпринята попытка теоретического объяснения некоторых основных свойств поля излучения фазированной решетки, основанная на моделировании работы указанного преобразователя.

За последние 20 лет наблюдается резкий рост интереса как пользователей, так и разработчиков средств и методов ультразвукового контроля к технологии, основанной на применении фазированных решеток. Это отражает тот факт, что на последних конференциях указанной тематике посвящено более трети докладов.

Использование технологии фазированных решеток обеспечивает такие возможности реализации ультразвуковой дефектоскопии, как программное управление углом ввода луча, изменение фокусного расстояния, высокоскоростной контроль без перемещения преобразователя, контроль изделий сложной формы и др. При детальном рассмотрении содержания докладов, а также статей, опубликованных в авторитетнейших журналах, мы не находим объяснения основных свойств поля излучения преобразователей на фазированных решетках.

В результате моделирования работы прямого преобразователя с фазированной решеткой приходим к следующим выводам:

1. Диаграмма направленности преобразователя с фазированной решеткой подобна импульсной диаграмме направленности линейного излучателя длиной $\approx 0,84$ длины решетки l_p и формируется при удалении от него на расстояние $h_{\text{бл}} \approx l_p$, характеризующее размер ближней зоны такого преобразователя.

2. В отсутствие фокусировки диаграмма направленности преобразователя с фазированной решеткой для достаточно больших дальностей соответствует импульсной диаграмме линейного излучающего элемента.

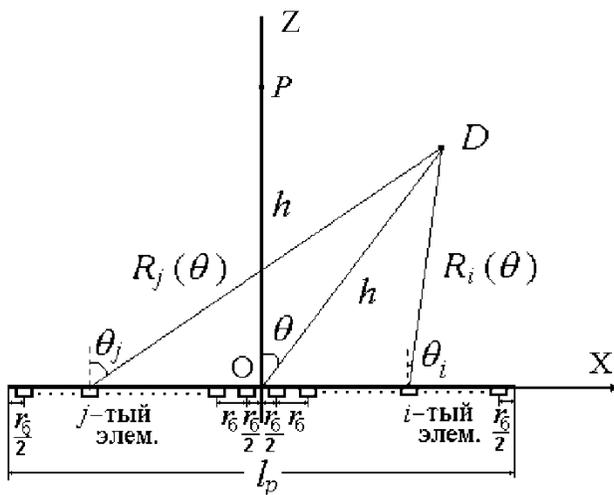


Рис. 1. Схема линейной решетки с излучающими элементами, использованная при моделировании работы прямого преобразователя

3. Для расстояний фокусировки h , превышающих размер ближней зоны $h_{\text{бл}}$ уменьшение амплитуды сигнала с ростом h происходит по закону, близкому к $\sim 1/h$.

4. Фокусировка сигнала, излучаемого преобразователем с фазированной решеткой, приводит к увеличению амплитуды этого сигнала в несколько раз (до 4–5) и особенно эффективна на относительных дальностях (h/l_p) до 2–3.

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ МАЛОАПЕРТУРНЫХ ЭМАП

Бобров В.Т.¹, Самокрутов А.А.¹, Бобров С.В.²

¹ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

²НУЦ «Качество», Москва, Россия

При неразрушающем контроле, преимущественно толщинометрии, измерении скорости распространения ультразвуковых колебаний для оценки напряженно-деформированного состояния металла и др. все чаще используют электромагнитноакустические преобразователи (ЭМАП), обеспечивающие возбуждение и прием сдвиговых объемных ультразвуковых волн без применения контактных сред. Дальнейшему расширению областей

применения ЭМАП препятствуют ряд причин, лежащих в основе физики процессов возбуждения и приема сдвиговых волн и связанных со слабой изученностью влияния особенностей конструкции на параметры, в частности, диаграммы направленности (ДН) ЭМАП. В работе [1] исследовалась функция направленности ЭМАП в режиме излучения ультразвука, проведен расчет ДН ЭМАП для возбуждения сдвиговой волны по нормали и под углом к поверхности объекта контроля (ОК), расчетные данные подтверждены экспериментально. Однако результаты работы не получили развития при создании малоапертурных ЭМАП. Изучению этих особенностей посвящен настоящий доклад.

В докладе отмечается, что наряду с достоинствами – более низкой скоростью сдвиговых волн по сравнению продольными, что расширяет диапазон измеряемых толщин, отсутствием жестких требований к качеству поверхности ОК и др., ЭМАП имеют существенные ограничения, связанные как с влиянием параметров ОК (магнитных характеристик, текстуры проката, диапазоном измеряемых толщин, кривизной поверхности), требований к погрешности и локальности измерения толщины, так и с особенностями процесса ЭМА возбуждения и формирования информативных сигналов. Определяющими параметрами ЭМАП, отвечающими за снижение влияния указанных ограничений, являются ДН и размер апертуры ЭМАП. Малая апертура в сочетании с острой диаграммой направленности ЭМАП обеспечивает формирование многократных сигналов при контроле ОК с большой кривизной, что дает возможность применения корреляционной обработки сигналов и, соответственно, повышения точности измерений. В докладе рассмотрены схемы возбуждения и факторы, влияющие на эффективность возбуждения-приема сигналов сдвиговой волны, обоснован выбор вариантов синфазного и противофазного возбуждения малоапертурного ЭМАП, обеспечивающего линейную или радиальную поляризацию и необходимую локальность области возбуждения, возможность использования ЭМАП для толщинометрии изотропных и анизотропных металлов и сплавов и контроля точечной сварки тонкостенных сварных конструкций. Показано, что ДН ЭМАП определяется также рабочей частотой и параметрами импульса возбуждения. Приведены примеры реализации малоапертурных ЭМАП с постоянным и импульсным подмагничиванием. К ним относится ЭМАП E73921 с постоянной магнитной системой на основе сплава «Неодим-железо-бор» (Nd-Fe-B), рабочей частотой 3 МГц, апертурой 6 мм, массой 19 г. и габаритными размерами $\varnothing 12 \times 40$ мм, предназначенный для работы с ЭМА толщиномером A1270, и другие типы малоапертурных ЭМАП [2]. Экспериментальный образец ЭМАП с импульсной подмагничивающей системой для контроля точечной сварки тонкостенных конструкций с противофазным возбуждением имеет сопоставимые массу и габариты и обеспечивает апертуру диаметром от 3 мм [3].

Литература

1. Буденков Г.А., Квятковский В.Н., Петров Ю.В., Сидельникова Н.В. Исследование диаграммы направленности электромагнитноакустического преобразователя. Дефектоскопия, 1971. № 4. С. 87–91.

2. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т., Алехин С.Г., Козлов В.Н. ЭМА преобразователи для ультразвуковых измерений. В мире НК. 2008. № 2. С. 22–25.

3. Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Козлов В.Н., Бобров С.В. К выбору методологии ультразвукового контроля точечной сварки. Научное издание «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Тезисы докладов 18-й Всероссийской конференции с международным участием». Нижний Новгород. Машиностроение. 2008. С. 75–76.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Будадин О.Н., Кутюрин В.Ю., Кутюрин Ю.Г., Юхацкова О.В.

*ОАО «ЦНИИ Специального машиностроения»,
Хотьково, Московской области, Россия*

В настоящем докладе рассмотрены экспериментальные исследования третьего метода со специальным тепловым возбуждением конструкции – метода ультразвуковой термографии. Он основан на следующем физическом принципе. Если в материал ввести достаточно мощные ультразвуковые колебания с соответствующей частотой, то вибрация материала в области дефекта (особенно «слипнутого» дефекта) приводит к взаимным перемещениям стенок дефекта. Это вызывает их нагрев вследствие трения. Температурное поле локализуется в области расположения внутреннего дефекта, по анализу которого возможно определить расположение дефекта, его характеристики и т.п. [1–3]. Образующееся температурное поле регистрируется с помощью специальной тепловизионной техники.

Фотография установки экспериментальных исследований приведена на рис. 1.

Результаты первичной регистрации информации в виде термограмм поверхности конструкции в различные моменты времени приведены на рис. 2 (а–г).

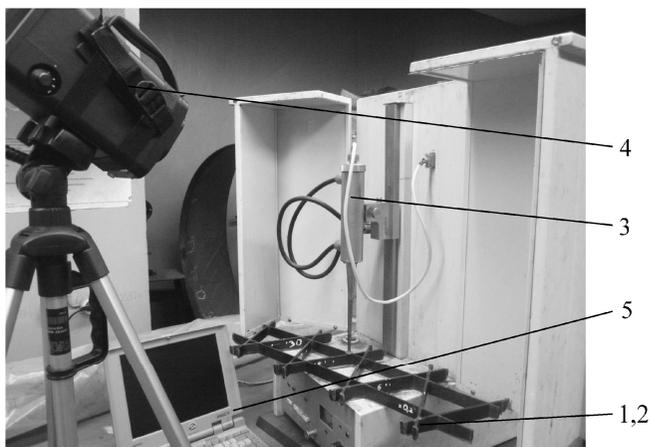
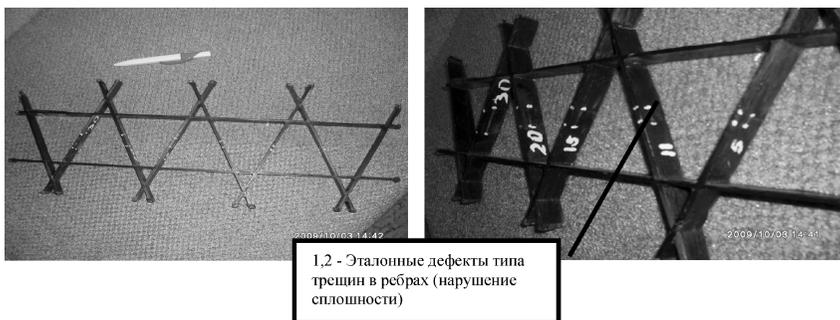


Рис. 1. Установка для экспериментальных исследований:

1 – исследуемый образец сетчатой конструкции с дефектом (2) типа нарушения сплошности; 3 – установка генерирования ультразвуковых колебаний и ввода их в изделие; 4 – тепловизионная система ИРТИС-2000 для регистрации температурных полей; 5 – компьютер для регистрации и обработки видеоизображений температурных полей

Из приведенного графика следует, что разность температуры между качественной и дефектной областями изделия составляет 1,5...4 °С, что вполне достаточно для достоверного выявления данных температурных аномалий тепловизионной аппаратурой ($\Delta T_{\text{разр}} = 0,1^\circ$).

Из рис. 4, 5 видно, что разность температуры между качественной и дефектной областями конструкции (выявляемость дефекта) уменьшается с расстоянием от точки ввода ультразвукового излучения до точки регистрации температуры, что обусловлено затуханием ультразвуковых колебаний в материале. Анализ приведенных результатов показывает, что возможно выявление дефектов на расстоянии до 150...350 мм от точки ввода ультразвуковых колебаний в зависимости от материала, мощности вводимого излучения и т.п.

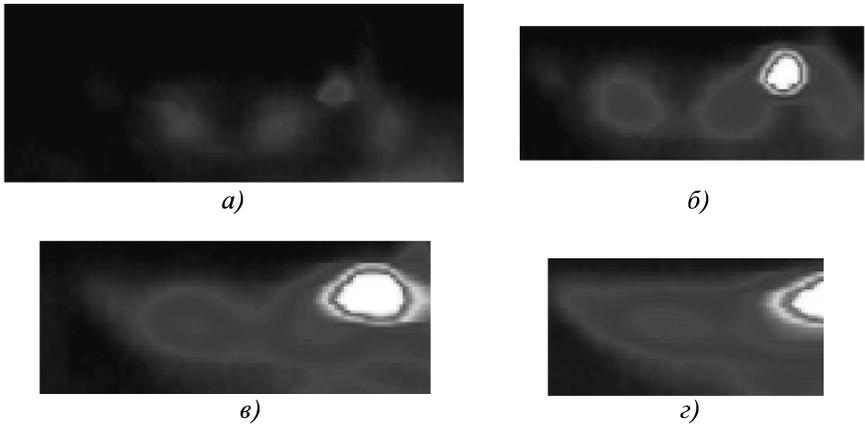


Рис. 2. $a - t = 1$ с; $б - t = 4$ с; $в - t = 10$ с; $г - t = 23$ с

Результаты обработки информации приведены на рис. 3–6.

Разность температур между качественной и дефектной областями, (град.С)

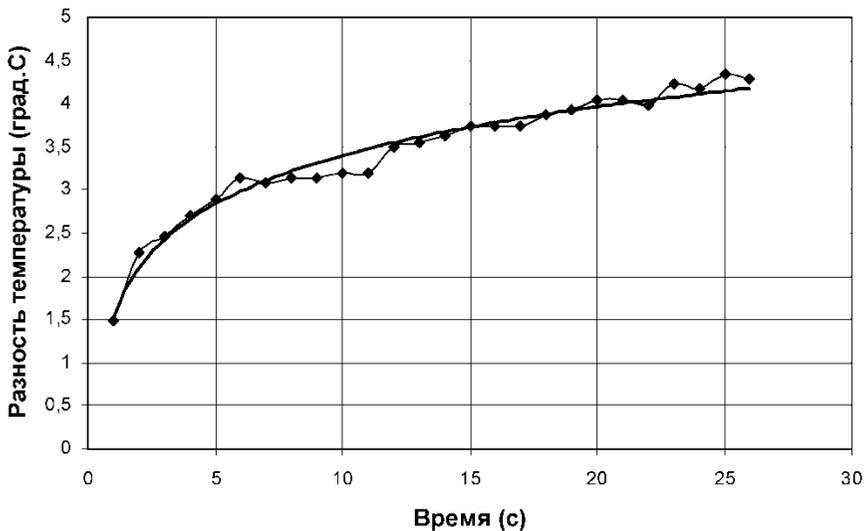


Рис. 3. Зависимость разности температур между качественными и дефектными областями конструкции при различном времени ультразвукового возбуждения

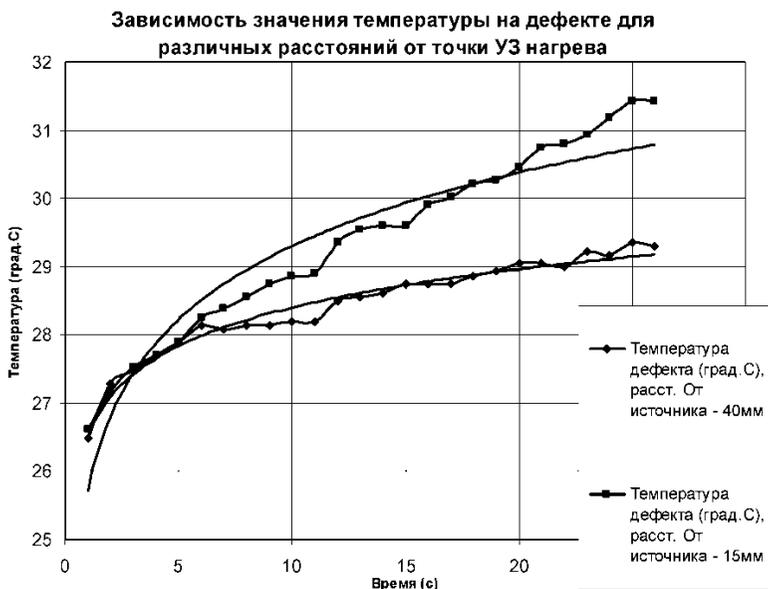


Рис. 4. Зависимость значения температуры на дефектной области от времени для различного расстояния от дефектной точки до точки ввода ультразвукового излучения

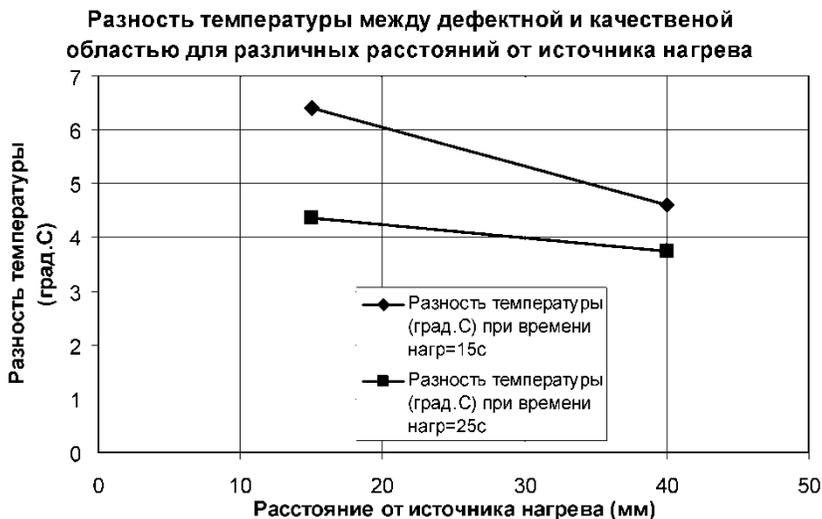


Рис. 5. Зависимость разности температуры между дефектной и качественной областями для различного расстояния от источника нагрева

Температурный профиль на дефектной области

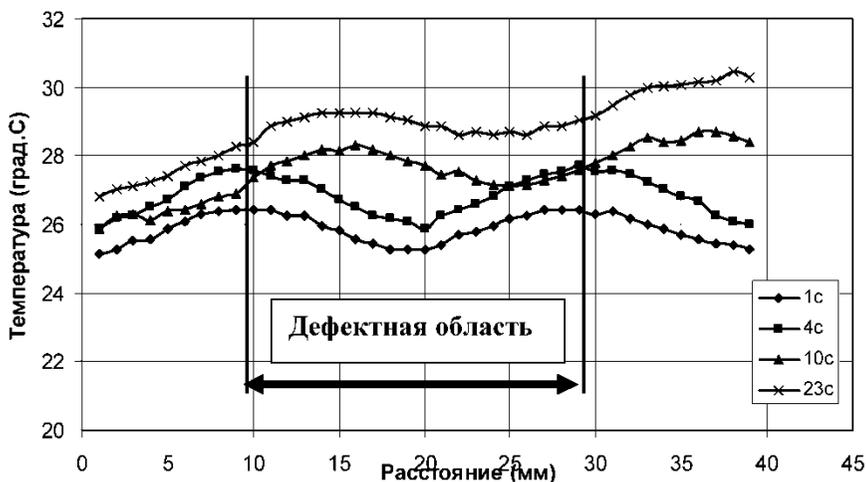


Рис. 6. Температурные профили в области дефекта для различных моментов времени ввода ультразвукового излучения

Из графика рис. 6 видно, что температурный профиль имеет неравномерный характер (на краю дефекта температура выше, чем в середине), что связано с раскрытием дефекта: чем меньше раскрытие дефекта (чем больше дефект «слипнут») тем лучше его выявляемость. Кроме того, край дефекта, расположенный ближе к точки ввода ультразвукового излучения выявляется лучше, о чем было сказано выше.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что возможно выявление «слипнутых» дефектов в сложных пространственных сетчатых конструкциях тепловым методом с тепловым возбуждением ультразвуковым излучением.

Литература

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М., Наука, 2002. 472 с.
2. Салихов З.Г., Будадин О.Н., Ишметьев Е.Н., Абрамова Е.В. и др. Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения. – М.: ИД МИСиС, 2008. 476 с.
3. Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Диагностика безопасности. Тепловой контроль. Под общей редакцией академика РАН Ключева В.В. – М.: Издательский дом Спектр, 2011. 171 с.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗОН СВАРНЫХ ТРУБ

Ткаченко А.А.¹, Исаенко Ф.И.¹, Кирияков В.Ф.¹,
Сирый В.Д.¹, Захаров А.Ф.²
¹НИИНК АО «ИНТРОСКОП», Кишинев, Молдова
²ОАО «ВМЗ», г. Выкса, Россия

В докладе рассмотрены особенности разработки и конструирования специализированных ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) для автоматизированного и ручного перепроверочного ультразвукового контроля краевых полос концов труб диаметром от 508 мм до 1420 мм и толщиной стенки от 7 мм до 48 мм для магистральных трубопроводов в условиях их производства. Для этих целей применяют установки типа НК-362, включающие в себя многоканальный дефектоскоп и многоканальные акустические блоки. Рассмотрены особенности ПЭП для автоматизированного ультразвукового контроля продольного сварного шва трубы диаметром от 189 мм до 270 мм и толщиной стенки от 4 мм до 10 мм. Установки типа НК-362 комплектуются ПЭП, предназначенными для выявления дефектов типа продольных трещин и расслоений в основном металле по всему периметру концевых участков труб, в технологическом потоке цеха после гидротестирования.

Основные технические параметры и характеристики ПЭП приведены в таблице.

Наименование ПЭП	Основные технические параметры и характеристики				
	Эффективная частота, $f_э$, МГц	Угол ввода УЗК α , град.	Диапазон контроля, мм	Габаритные размеры, мм	Масса, г
П121-2,5-45-30/3-001	2,5 ± 0,25	45 ± 1,5	2 – 50	90×37×90	450
П121-5-45-30/3-001	5,0 ± 0,5	45 ± 1,5	2 – 50	90×37×90	450
П112-5-4×40-4-001	5,0 ± 0,5	0	2 – 40	68×23×90	140
П112-5-4×40-7-001	5,0 ± 0,5	0	2 – 40	68×23×90	140
П112-2,5-3,5×40-4-002	2,5 ± 0,25	0	3 – 40	44×18×42	75
П112-2,5-3,5×40-7-002	2,5 ± 0,25	0	3 – 40	44×18×42	75
П112-5-3,5×40-4-002	5,0 ± 0,5	0	2 – 40	44×18×42	75
П112-5-3,5×40-7-002	5,0 ± 0,5	0	2 – 40	44×18×42	75
П121-4,0-45-001	4,0 ± 0,4	45 ± 1,5	1–50	39×25×45	80

Общие параметры для всех ПЭП:

– отклонение амплитуды эхо-сигнала от номинального значения, не более ± 4 dB;

– отношение сигнал/шум, не менее 16 dB.

Наклонные ПЭП по п. 1 таблицы предназначены для выявления продольных дефектов в стенке концевых участков труб. Отличительной особенностью этих ПЭП является широкая диаграмма обнаружения по фронту (не менее 30 мм) при минимальной ее неравномерности, благодаря специальному расположению пьезоэлементов на призме. Раздельно-совмещенные (р/с) ПЭП, приведенные в п. 2 таблицы, разработаны с широкой диаграммой обнаружения по фронту (не менее 32 мм), обладающей высокой равномерностью по длине рабочей поверхности преобразователя и минимальной амплитудой подъема эхосигнала на ее краях и предназначены для выявления расслоений по всей толщине стенки трубы с минимальными «мертвыми» зонами у ее поверхностей [1]. Р/с ПЭП по п. 3 таблицы предназначены для ручного перепроверочного контроля качества концевых участков труб, забракованных при автоматизированном контроле установками НК362. Отличительные особенности данных ПЭП аналогичны особенностям р/с ПЭП по п. 2 таблицы. В перечисленных ПЭП используются разъемы фирмы LEMO. Наклонные ПЭП по п. 4 таблицы предназначены для автоматизированного ультразвукового контроля продольного сварного шва трубы в линии производства труб сваркой давлением. Отличительной особенностью данных ПЭП, наряду с высокой чувствительностью, является то, что они снабжены отдельным приемным пьезоэлементом, обеспечивающим слежение за качеством акустического контакта при контроле. В данных ПЭП используются разъемы типа SMA. Для всех перечисленных ультразвуковых преобразователей разработаны специальные согласующие устройства, позволяющие вести контроль с одинаковой чувствительностью как автоматизированным способом с использованием длинного (до 30 м) радиочастотного соединительного кабеля, так и на постах ручной перепроверки труб с использованием короткого кабеля длиной до 1,5 м. В докладе отражены конструкционные особенности ПЭП и изображения их внешнего вида. Преобразователи выпускаются промышленными партиями в НИИНК АО «INTROSCOP» и успешно используются в трубосварочных цехах.

Литература

1. **Ткаченко А.А.** Способы и аппаратура ультразвукового контроля краевых полос концов сварных труб в потоке их производства. Материалы XVIII Всероссийской конференции с международным участием НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА. Нижний Новгород 29.09-03.10.2008.– М.: Машиностроение, 2008. 310 с.

СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ОТЛИВОК – НОВЫЙ ОБЪЕКТ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Воронкова Л.В.¹, Носов В.А.²

¹ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия

²ООО «ЧугунСпецСтрой», Липецк, Россия

В докладе рассматриваются возможные применения ультразвуковой дефектоскопии и структуроскопии для контроля сварных соединений чугуна с шаровидным графитом.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом относится к группе трудно свариваемых материалов. При высоких скоростях плавления и кристаллизации, характерных для термического цикла сварки, в высокопрочном чугуне образуются хрупкие карбидные структуры, не способные воспринимать высокие сварочные напряжения. Как следствие – образование трещин сварного шва. Для снижения сварочных напряжений используется предварительный подогрев свариваемых изделий. Однако, даже при формировании сварного шва полностью из цветных сплавов не удастся избежать формирования карбидов в зоне сплавления и хрупких структур в околошовной зоне. Это также может привести к образованию трещин сразу после сварки, или при эксплуатации сварного соединения.

Еще одной трудностью сварки чугуна является комплекс неблагоприятных теплофизических свойств: низкая температура плавления, низкая теплопроводность и повышенная теплоемкость (в сравнении с хорошо свариваемой низкоуглеродистой сталью). Эти свойства существенно усложняют получение качественной формы сварного шва. Соблюдение всех технологических рекомендаций при сварке труб из ВЧШГ обеспечивает формирование равнопрочного, плотного соединения работоспособного в условиях эксплуатации напорных трубопроводов различного назначения: водоводы, теплотрассы, нефте- и газопроводы.

Перед проведением сварки чугуна необходимо оценить его структуру, а именно содержание шаровидного графита. Отклонение включений графита от шаровидной формы приводит к разупрочнению сварного соединения. Структуроскоп УС-3ЦЛ, использующий головную волну, позволяет по времени ее пробега, кореллированного, при постоянной базе прозвучивания, со скоростью продольной волны, получить значение процентного содержания шаровидного графита. Односторонний доступ к отливке и возможность проводить контроль по криволинейной поверхности, масса с аккумулятором 0,5 кг обеспечивает проведение структуроскопии чугуна в сложных промышленных условиях.

После проведения структуроскопии зоны термического влияния и сварки чугуна прямым раздельно-совмещенным преобразователем дефек-

тоскопируется вышеупомянутая зона на наличие горизонтальных трещин. Затем совмещенным наклонным преобразователем П121-5-70 проводится контроль наплавленного металла и околошовной зоны. Предварительно экспериментально определяется угол ввода ультразвука. Скорость поперечной волны в чугуне меньше, чем в стали, и угол ввода составляет обычно 65...67°. Чувствительность для толщин 6...8 мм настраивается по зарубке 2×1 мм, в верхнем и нижнем положении. Были проконтролированы кольцевые сварные соединения чугунных труб диаметром 150...300 мм.

Критерий контролепригодности – отношение сигнал/шум составляло 12...16 дБ для эхо-сигнала от зарубки. Это позволяет надеяться на успешное применение ультразвукового контроля сварных соединений чугунных труб. В настоящее время разработанная авторами методика проходит промышленное опробование. Впервые проводящийся ультразвуковой контроль сварных соединений чугунных отливок расширяет область применения неразрушающих методов контроля.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ДЕФЕКТΟΣКОПА ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ КОНТРОЛЕ КРАЕВЫХ ПОЛОС КОНЦОВ СВАРНЫХ ТРУБ

Ткаченко А.А.

НИИ НК АО «ИНТРОСКОП», Кишинев, Молдова

Доклад посвящен вопросам автоматизированного ультразвукового контроля краевых полос концов труб для магистральных трубопроводов при их производстве. Для этих целей применяют установки, включающие в себя многоканальный дефектоскоп и многоканальные акустические блоки. Многоканальный акустический блок (рис. 1), содержит раздельно-совмещенные (р/с) ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) для выявления расслоений и наклонные ПЭП – для выявления продольных трещин в краевой полосе стенки трубы. Для создания акустического контакта между рабочей поверхностью ПЭП телом стенки трубы используется контактный слой жидкости (КСЖ). Генераторно-усилительный каналный блок, радиочастотный кабель (р/кабель) связи, ПЭП и КСЖ составляют электроакустический тракт многоканального дефектоскопа.

В докладе исследованы параметры тракта, содержащего р/с ПЭП. Для выявления подповерхностных расслоений при малой толщине КСЖ в р/с ПЭП важно эффективно использовать акустический экран между призмой излучающего пьезоэлемента (ПЭ-Г) и призмой приемного пьезоэлемента (ПЭ-П). В случае изменения толщины КСЖ в пределах более половины УЗК возникает существенный уровень осцилляции амплитуды зондирующего

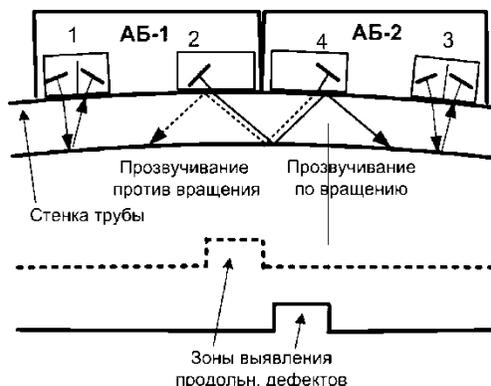


Рис.1. Схема размещения акустических блоков и контроля:
 1, 3 – раздельно-совмещенные ПЭП; 2, 4 – наклонные ПЭП

импульса [1]. Необходимо определить условия, при которых можно уменьшить уровень осцилляции. В установках акустические блоки соединены с дефектоскопом краевых полос концов трубы: длинными р/кабелями (более 10 м). Генератор на входе р/кабеля формирует видеоимпульс $U(t)$ амплитудой более $200V$ и длительностью на уровне 0,1 не более $0,5T$, где T – период пьезослоя ПЭ-Г. В момент времени $t = 0$ передний фронт импульса $U(t)$ достигает выходного конца кабеля. Решающее значение имеет длительность переднего фронта ($t_{ПФ}$). Примем $t_{ПФ} \approx 0,25T$. Используемый кабель имеет волновое сопротивление ($WК$), обычно равное 50Ω . Следовательно, источник сигнала $U(t)$ с внутренним сопротивлением $WК$ нагружен на электрическую емкость ПЭ-Г (C_0), например, равную 1000 ПФ. В пьезослое в начальный промежуток времени ($\Delta t_{ПФ}$) имеется ток смещения, т.е. во время $\Delta t_{ПФ}$ напряженность электрического поля приближенно равна нулю. Во время $\Delta t_{ПФ}$ имеет место отражение $U(t)$ обратно в кабель с изменением фазы. Если рассматривать на входном конце кабеля импульс, отраженный от C_0 (обозначим $U'(t)$), то можно видеть, что $U'(t)$ имеет биполярную форму: уровень амплитуды первого пика зависит от величины C_0 , полярность 2^{го} пика совпадает с полярностью $U(t)$. 2^й пик соответствует наличию напряженности электрического поля в пьезослое, то есть возникновению импульса ударного давления, излучаемого в пьезосреду ($P^0(t)$) и оргстекло призмы ПЭ-Г ($P^0(t)$). Передний фронт $P^0(t)$ оказывается задержанным относительно $t = 0$ на время $\Delta t_{ПЕР}$. Соотношению волновых сопротивлений сред (0 – демпфер, 1 – пьезопластина, 2 – оргстекло) обычно удовлетворяет соотношение $\rho_0 c_0 < \rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$. Импульс $P_2^0(t)$ в момент времени $t = \Delta t_{ПФ} + d_{П}/c_{П}$ достигает границы 1,0 ($d_{П}$ – толщина пьезопласти-

ны; c_{II} – скорость звука в пьезосреде). Часть энергии $P^0(t)$ отражается с изменением фазы. Отражение сопровождается появлением $1^{го}$ «индуктивного» заряда на C_0 . Далее появляются следующие импульсные заряды по мере обхода ударным импульсом $P^0(t)$ толщины пьезопластины. В оргстекло излучается совокупность разнополярных импульсов [2]. Совокупность однополярных импульсов обозначим $P^0(t)$. Можем записать

$$P(t) = P(t) + D_{12} R R_p(t),$$

где R_{10} – коэффициент отражения от границы сред 1,0; от границы сред 1,2; n – порядковый номер обхода толщины $2d_{II}$.

Уменьшение длительности $P^0(t)$ можно достичь, уменьшая R_{10} (уменьшение R_{12} не представляется возможным). Часть энергии импульса $P^0(t)$ отражается от границы оргстекло-вода (обозначим $R_{0-В}$, опуская запись t), другая часть энергии отражается от границы вода-сталь ($R_{В-С}$). Малая часть энергии $P^0(t)$ проходит в сталь (зондирующий импульс) и отражается от расслоения металла стенки трубы. Отраженный сигнал от расслоения проходит КСЖ и призму ПЭ-П. На входе ПЭ-П формируется δ -сигнал, усиливаемый усилителем дефектоскопа. На выходе усилителя до появления δ -сигнала появляется $1^{й}$ РВ-С-сигнал. При отсутствии подповерхностного расслоения, например, на глубине 2 мм, кроме $1^{го}$ РВ-С – сигнала можно наблюдать $2^{й}$ РВ-С, $3^{й}$ РВ-С-сигнал и т.д. Если расслоение находится на глубине 2 мм, то время между $1^{м}$ РВ-С -и δ -сигналом равно $0,8\mu S$. Примем, время между $1^{м}$ РВ-С -и $2^{м}$ РВ-С -сигналом равно $1\mu S$ (толщина КСЖ равна $0,7$ мм).

Примем, что эти сигналы не интерферируют друг с другом. В этом случае δ -сигнал от расслоения на глубине 2 мм расположен между $1^{м}$ РВ-С -и $2^{м}$ РВ-С -сигналом. Отсутствие интерференции имеет место при длительности $P_2(t)$ меньше $1\mu S$, т.е. $P_2(t)$ должен содержать не более 4 T (рабочая частота ПЭП не менее 4 МГц).

Эффективность использования акустического экрана состоит в том, чтобы амплитуда $2^{го}$ В-С-сигнала была меньше, не менее чем в 2 раза амплитуды δ -сигнала. При изготовлении р/с ПЭП необходимо обеспечить отсутствие электромагнитной связи между ПЭ-Г и ПЭ-П. Однако при возбуждении ПЭ-П малая часть энергии $U(t)$ проникает на ПЭ-П. Экспериментально установлено, что амплитуда импульса, возбуждающего ПЭ-П, должна быть не более $0,005$ амплитуды $U(t)$. При нарушении этого условия, ПЭ-П излучает импульс, и появляются эхосигналы, уровнем амплитуд которых нельзя пренебречь. Отметим, что $1^{й}$ РВ-С-сигнал существует всегда при наличии КСЖ и его можно использовать для формирования строб-импульса, определяющего зону контроля металла стенки трубы. Эхосигналы от подповерхностного расслоения могут интерферировать со $2^{м}$ и последующими РВ-С-сигналами.

Выводы: выбор толщины КСЖ, подбор акустического экрана между ПЭ-Г и ПЭ-П, минимизация электромагнитной связи между ними, формирование строб-импульса по первому В-С-сигналу, применение специальных электронных устройств для согласования элементов ПЭП с соединительным кабелем – способы оптимизации параметров электроакустического тракта выявления расслоений, использованные при модернизации установки контроля концевых участков труб типа НКЗ62. В установке используются 4 акустических блока – по два на каждом конце трубы для обеспечения минимальной мертвой зоны от сварного шва. Контроль полосы в 60 мм происходит за два оборота – прямо и обратном направлении. Это обусловлено тем, что ширина захвата р/с ПЭП составляет 30 мм.

Литература

1. Могильнер Л.Ю., Сахранов А.В., Урман Н.С. Прохождение ограниченного ультразвукового пучка через плоский слой контактной жидкости при наклонном падении в импульсном режиме излучения // Дефектоскопия. 1986. № 1.
2. Ткаченко А.А. О слежении за сварным швом трубы со снятым gratom при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. 2004. № 5.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

Тимохин А.В., Модин А.Ю., Стеблев Ю.И., Пилуй В.А.,
СамГТУ, Самара, Россия

Обеспечение промышленной безопасности нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств невозможно без широкого применения средств неразрушающего контроля (НК) для периодического мониторинга, инструментального обследования технологического оборудования. Одной из проблем в системе диагностического мониторинга опасных производств является контроль сварных соединений трубных проволочек контрольно-измерительных приборов (КИП). Эти трубные конструкции являются элементами отборных устройств измерителей расхода, давления и температуры, входящих в состав технологических трубопроводов нефтехимических промышленных установок с условным давлением до 10 МПа (100 кгс/см²).

Объекты контроля представляют собой стыковые, нахлесточные и тавровые сварные соединения трубных элементов диаметром от 14 мм до 22 мм с толщиной стенки от 2,5 мм до 6,0 мм, а также тавровые сварные соединения типа «труба – камера диафрагмы» датчиков расхода.

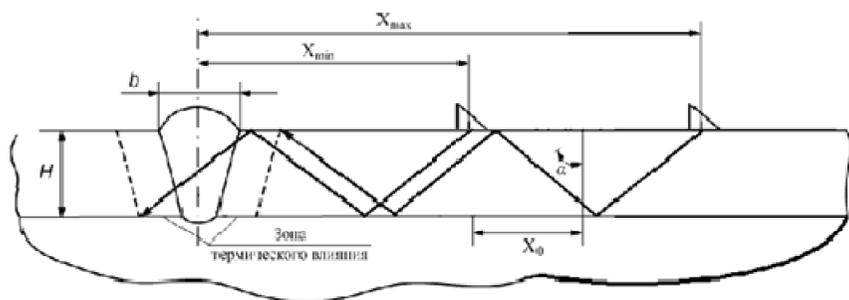


Рис. 1. Схемы контроля сварных соединений многократно отраженным лучом

В СамГТУ совместно с ООО «Сервис-Центр-Автоматика» (г. Новокуйбышевск) создана переносная промышленная установка для ультразвукового контроля (УЗК) указанной номенклатуры сварных соединений в условиях эксплуатации на базе отечественного дефектоскопа УИУ серии «СКАНЕР» фирмы МНТП «АЛТЕС».

Для этого:

- определены параметры контроля основных типов сварных соединений: стыковых, тавровых и нахлесточных с учетом требований нормативно-технической документации;
- разработан комплект ультразвуковых преобразователей (УЗП) и стандартных образцов предприятия (СОП) для настройки чувствительности дефектоскопа;
- разработаны алгоритмы обработки и идентификации ультразвуковых сигналов в условиях воздействия различного типа помех;
- разработана и аттестована методика УЗК сварных соединений малоразмерных трубных элементов [3].

Тонкостенность сварных соединений, сложная геометрия швов, необходимость контроля не только основного сечения шва, но и зон термического влияния исключают возможность контроля прямым лучом. В зависимости от типа сварного соединения используются схемы УЗК однократно-отраженным, двух или трехкратно-отраженным лучом (рис. 1).

Применение схем УЗК многократно отраженным лучом позволяет провести акустическое зондирование различных сечений шва и околошовных зон – зон термического влияния. Однако при этом снижается помехозащищенность контроля вследствие затухания акустических сигналов при переотражениях от цилиндрической поверхности и возможности появления «ложных» эхо-сигналов [1, 2].

С целью повышения помехозащищенности и достоверности УЗК:

- разработана методика повышения точности измерения координат отражателей, позволяющая проводить идентификацию эхо-сигналов от дефектов на фоне помех;

– разработаны алгоритмы и программное обеспечение компьютерной обработки и визуализации диагностической информации, как в процессе проведения контроля, так и на стадии последующей обработки этой информации.

Один из основных показателей эффективности неразрушающего контроля – его достоверность. Для исследования достоверности результатов УЗК сварных соединений труб малого диаметра были изготовлены образцы для проведения комплексных лабораторных испытаний с применением как средств неразрушающего, так и разрушающего контроля.

Методика проведения испытаний включала следующие методы контроля:

- ультразвуковой контроль с применением разработанной установки;
- радиационный контроль;
- разрушающий и оптико-электронный контроль;
- визуально-измерительный контроль сечений сварных швов в процессе разрушающих испытаний.

Проведенные испытания показали не только высокую эффективность разработанных средств, но и необходимость расширения сервисных функций и совершенствование программного обеспечения компьютерной обработки и визуализации диагностической информации.

В настоящее время установка успешно эксплуатируется для контроля трубных проводок КИП технологических установок на НПЗ г. Новокуйбышевск.

Литература

1. **Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.** Ультразвуковой контроль. Справочник по неразрушающему контролю. Т. 3. №. Под ред. Ключева В.В. – М.: Машиностроение, 2004. 859 с.
2. **Алешин Н.П.** Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. – М.: Машиностроение, 2006. 368 с.

О ПРИМЕНЕНИИ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННОГО ПЭП В РЕЖИМЕ ПРИЕМА ЭХОСИГНАЛОВ

Ткаченко А.А.

*НИИ НК АО «ИНТРОСКОП»,
Кишинев, Молдова, Россия*

В докладе рассмотрены результаты экспериментальных исследований согласования раздельно-совмещенного (р/с) пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) с электронной аппаратурой в режиме приема эхосигналов. Р/с ПЭП применяется при ультразвуковом контроле труб в потоке их производства для выявления дефектов типа «расслоение» в металле стенки

трубы. В условиях цеха есть необходимость размещать аппаратуру на значительном расстоянии от р/с ПЭП, например, 10...30 м. Принятые эхосигналы формируются на выходе приемного пьезоэлемента (ПЭ-П), электрическая емкость которого ($C_{оп}$) обычно не менее 1000 pF. Следовательно, ПЭ-П является источником эхосигналов, внутреннее сопротивление которого имеет емкостной характер. Нас интересует эхосигнал от расслоения в стенке трубы (δ -сигнал). Примем, что δ -сигнал имеет вид. Выходное сопротивление ПЭ-П равно $1/\omega C_{оп}$, где (ω – угловая частота затухающих колебаний). Эхосигналы от ПЭ-П распространяются по р/кабелю ко входу радиочастотного усилителя. Если входное сопротивление усилителя $Z_{вх}$ равно волновому сопротивлению кабеля $Z_{к}$, то нет отражения эхосигналов от $Z_{вх}$. Однако, если $Z_{вх} \neq Z_{к}$, то имеет место отражение, т.е. возникает процесс реверберации δ -сигнала между концами р/кабеля. Этот процесс можно использовать для увеличения амплитуды δ -сигнала на входе усилителя. Реверберацию можем рассмотреть только для первого полупериода δ -сигнала. Длительность полупериода равна $0,1 \mu s$ для частоты 5 МГц. Для простоты заменим первый полупериод видеоимпульсом по условию: амплитуда равна A , а длительность меньше $0,1 \mu s$. Примем, что появился на входе кабеля в момент $t=0$. В момент $t=L/v$ импульс появится на $Z_{к}$ выходе кабеля, т.е. на $Z_{к}$ (где L – длина кабеля, v – скорость распространения импульса). При $t=L/v$ импульс отражается без изменения фазы. Отраженный импульс в $t=2L/v$ момент времени появляется на входном конце р/кабеля и отражается от ПЭ-П с изменением фазы, так как обычно $Z_{к} \gg |1/C_{оп}|$. Значение $T_{к}$ есть полпериода процесса реверберации ($0,5 T_{к}$). Полный период $T_{к}$ равен $2L/v$. Для реального δ -сигнала, при соблюдении условия $Z_{к} \gg |1/C_{оп}|$ имеет место увеличение амплитуды δ -сигнала на входе усилителя, так как процесс реверберации вырождается в процесс суммирования заполняющих колебаний. Период задан параметрами излучающей пьезопластины: где n – толщина пьезопластины; a_n – скорость звука в пьезосреде. Отметим, что $T_{к} = 2L/v$. Для частоты 5 МГц оптимальная длина р/кабеля равна 8...10 м. Экспериментальная проверка показала, что при $Z_{к} \gg |1/C_{оп}|$ имеет место увеличение амплитуды δ -сигнала в 3–5 раз относительно случая, когда $Z_{к} = |1/C_{оп}|$. Следует отметить, что при ударном возбуждении излучающей пьезоэлектрической пластины (ПЭ-Г) р/с ПЭП также полезно использовать процесс реверберации возбуждающего видео-импульса между концами р/кабеля. Возбуждающий импульс является ударным, если его длительность меньше или равна $T_{к}$. Как правило, p и p ПЭ-Г равны p и p ПЭ-П соответственно. Для ПЭ-Г необходимо соблюдать условия: $Z_{к} \gg Z_{к}$, где $Z_{к}$ – активное выходное сопротивление источника ударного видеоимпульса. При этом оптимальная длина р/кабеля для возбуждения ПЭ-Г на частоте 5 МГц также равна 8...10 м.

К ВОПРОСУ ОБ ЭТАЛОНИРОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Пилуй В.А.

СамГТУ, Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам выбора оптимальной формы искусственного отражателя для выявления расслоений в катаных листах.

В развитие поднятого авторами работы [1] вопроса о введении в ГОСТ 22727 ряд дополнений с целью повышения надежности выявления дефектов рассмотрим несколько аспектов, касающихся сплошности основного металла объектов газонефтепроводного транспорта. Например, нормативный документ [2] на проектирование магистральных трубопроводов гласит: «В металле труб не допускается наличие ...расслоений длиной свыше 80 мм в любом направлении ...». Причина их появления в прокате – раскатка газовых пузырей, остающихся в слитке после его кристаллизации. Вследствие этого они имеют форму, вытянутую вдоль направления прокатки, а ширина их – 2...5 мм. В процессе эксплуатации вследствие коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) ширина их может составлять 10...20 мм, рис. 1. Аналогичная картина – и в металле

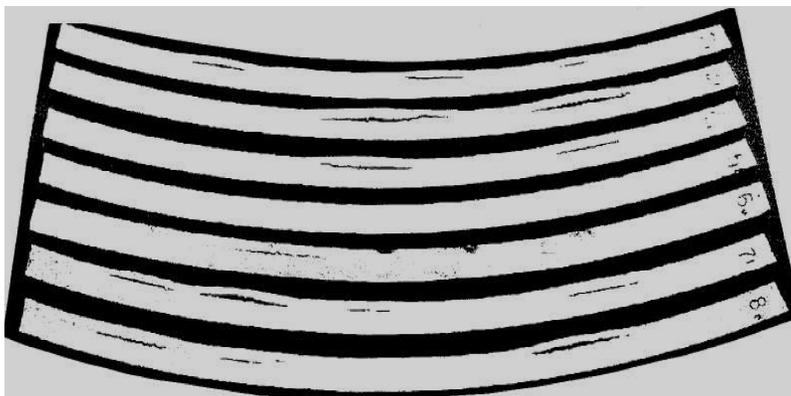


Рис. 1. Макрошлифы поперечных сечений темплетов с расслоениями из нефтепровода

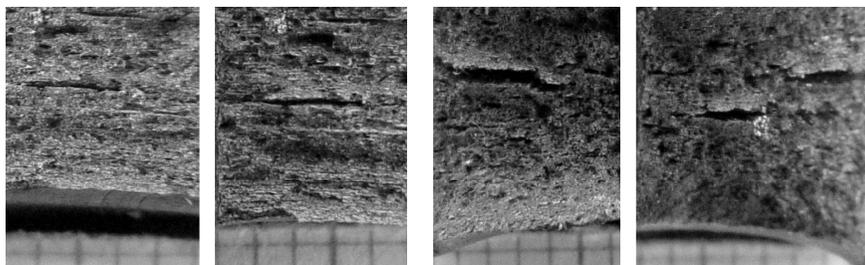


Рис. 2. Поперечные изломы темплетов с расслоениями из днища резервуара

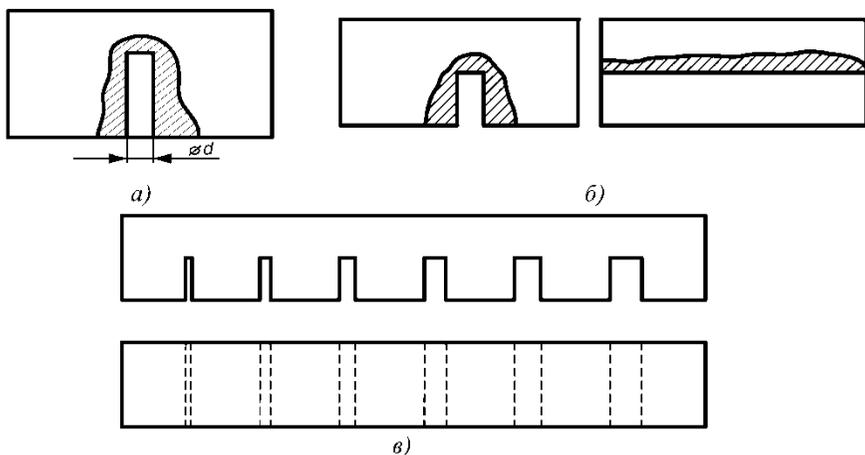


Рис. 3. Искусственные отражатели контроля листового проката в виде:
а – плоскодонного сверления; *б* – плоскодонного паза; *в* – СОП

резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, рис. 2. Так как дефекты здесь имеют вытянутую форму, то для получения максимальной амплитуды эхо-импульса от них и форма пьезоэлементов УЗП должна быть также вытянутой, а длина $2a$, в соответствии с вышесказанным – не менее 20 мм. Для проведения исследований вначале выберем искусственный отражатель (ИО) для количественной оценки результатов выявляемости расслоений. Согласно ГОСТ 22727 им является плоскодонное сверление, рис. 3, *а*, определенного диаметра. Однако здесь налицо явное нарушение основополагающего принципа при создании методик ультразвукового контроля: форма выбранного ИО должна быть максимально приближена к преимущест-

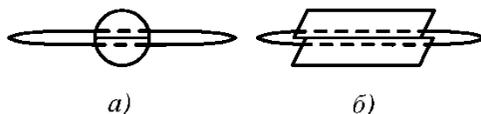


Рис. 4. Области озвучивания вытянутых расслоений Р-С УЗП с пьезоэлементами:

a – полудиски Ø12 мм; *б* – 33×6 мм

венной форме возможных дефектов в данном виде объектов контроля. Такой формой здесь может быть только **плоскостной паз** определенной ширины, рис. 3, б. ИО, рис. 3, а, правомерно использовать только при контроле сплошности основного металла **кованых** объектов, где возможны дефекты округлой формы, так и плоскостные. Согласно рис. 4, расслоения эффективнее выявляются при использовании широколучевых РС преобразователей.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ВАЛОВ ТУРБИН И ГЕНЕРАТОРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Сидоренко И.Г.
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Цилиндрические поковки являются типичными представителями продукции ответственного назначения, для которых обязательны процедуры технологического ультразвукового контроля с установленными требованиями по чувствительности. Задача по разработке новых и оптимизации существующих методов ультразвукового контроля с целью обнаружения и оценки поверхностных и объемных дефектов валов турбин и турбогенераторов представляет большой научно-практический интерес. Разработка новых средств и методов ультразвукового контроля направлена на расширение возможностей (в первую очередь, повышение чувствительности контроля) применения ультразвуковой аппаратуры. Стандартные методы ультразвукового контроля с достаточной степенью надежности позволяют выявлять дефекты размерами в плоскости от 1 мм. Однако, выявление подобных дефектов на ранних стадиях изготовления (до прохождения изделием термической и механической обработки) весьма затруднительно. В связи с этим обеспечение более высокой чувствительности на ранних стадиях изготовления позволит дать большую экономию в результате снижения затрат труда на контроль и экономию металла. На данном этапе для обнару-

жения дефектов валов турбин и генераторов разработана схема контроля с помощью наклонных искателей продольными волнами с малыми углами вода ультразвукового пучка. Учтены направленные свойства применяемых искателей в условиях изменения параметров контактной жесткости по рабочей поверхности искателя в рамках граничных условий в приближении «линейного скольжения». На основании численных оценок изменения направленных свойств сформулированы рекомендации по выбору параметров контроля.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ С ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКОЙ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ

Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.

*ООО «Акустические Контрольные Системы»,
Москва, Россия*

Ультразвуковые (УЗ) дефектоскопы, визуализирующие внутреннюю структуру объектов контроля (ОК), находят все более широкое применение. В них для излучения и приема УЗ сигналов используются многоэлементные антенные решетки, а результатом их работы является двумерное изображение сечения ОК, называемое томограммой.

Принцип действия большинства этих приборов основан на физическом формировании фазированной антенной решеткой электронноуправляемого пучка ультразвука [1]. Главный недостаток этого принципа – ограниченный размер области точной фокусировки УЗ пучка и, как следствие, возможность измерения эквивалентной площади малоразмерной несплошности по амплитуде эхосигнала от нее только в этой зоне. Увеличение зоны точной фокусировки неизбежно снижает быстродействие аппаратуры [2].

Принцип комбинационного зондирования ОК антенной решеткой с последующей цифровой фокусировкой ее апертуры в каждую точку визуализируемой области ОК свободен от этих недостатков [2]. Наряду с высоким быстродействием этот принцип позволяет гибко использовать информацию многократных отражений УЗ импульсов от границ ОК в случае контроля объектов с плоскими поверхностями, в частности, плит, пластин и их сварных соединений. В зависимости от характера предполагаемых дефектов можно использовать разные алгоритмы реконструкции томограмм, добиваясь наилучшего выявления как диффузно, так и зеркально отражающих несплошностей [3].

В отличие от металлов с относительно изотропной и однородной структурой изделия из полимерных композитных материалов (ПКМ) контролировать значительно труднее. Вследствие ярко выраженной анизотропии упругих свойств и наличия чередующихся слоев волокон и связующего

УЗ сигналы могут распространяться в них преимущественно вдоль или поперек слоев. Траектории распространения УЗ сигналов под произвольными углами к слоям трудно предсказуемы. Тем не менее, принцип цифровой фокусировки антенной решетки, оперирующий с полным набором реализаций сигналов, полученных независимо от каждой пары элементов решетки, позволяет обнаруживать несплошности не только ориентированные параллельно внешней поверхности ОК, но и под некоторыми углами к ней.

В томографическом режиме УЗ дефектоскопа A1550 IntroVisor [4] реализован принцип цифровой фокусировки антенной решетки. В этом приборе используются 16-элементные антенные решетки с прямым и наклонным вводом ультразвука в ОК. Их особенностью является сменный акустический модуль и встроенный в корпус решетки электронный блок управления. Такое решение позволяет оперативно менять назначение антенной решетки в зависимости от контроля объектов из разных материалов с плоскими или неплоскими поверхностями (трубы, сосуды).

Литература

1. **Introduction** to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. – Quebec: R/D Tech Inc., 2004. – 368 p.

2. **Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.** О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов. – В мире неразрушающего контроля, 2011. № 1 (51). С. 64 – 70.

3. **Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.** Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки. – Дефектоскопия, 2011. № 1. С. 21 – 38.

4. **Шевалдыкин В.Г., Алехин С.Г., Бишко А.В., Дурейко А.В., Климентьев А.А., Соколов Н.Ю., Самокрутов А.А.** Заглянуть в металл: теперь это просто. – В мире НК, 2008. № 1 (39). С. 46 – 53.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ В ОАО «ЧМК»

Молоканов С.Я.

ОАО «ЧМК», Челябинск, Россия

Доклад посвящен методическим особенностям и эффективному применению средств неразрушающего контроля металлопродукции в ОАО «Челябинский металлургический комбинат». Комбинат является крупнейшим производителем сталей и сплавов: нержавеющей, быстрорежущих, инструментальных, рессорных, подшипниковых, автоматных, конструкционных, термостойких, жаропрочных и др. На комбинате производится бо-

лее полутора тысяч марок сталей и сплавов. Поставка качественной металлопродукции на экспорт является одной из приоритетных направлений развития комбината. Обязательное условие поставок поковок на экспорт – проведение 100%-ного ультразвукового контроля (УЗК) в соответствии с европейскими и американскими стандартами. В настоящее время увеличивается портфель ответственных заказов на производство поковок в соответствии с требованиями стандартов энергетического машиностроения и требованиями Госатомнадзора. Значительный объем ультразвукового контроля поковок, катаных заготовок, сортового и листового проката с УЗК и необходимость методического обеспечения и систематизации результатов УЗК потребовали создание электронной базы данных. С 1996 года вводится электронных архив результатов УЗК, его объем составляет более 150 тыс. поковок, около миллиона тонн сортового и листового проката, представлено подробными дефектограммами по каждой единице металлопродукции. Анализ результатов ультразвукового контроля позволяет оценить уровень технологии производства и качества производимых поковок и проката, определить ряд технических и организационных мероприятий, обеспечивших конкурентоспособность продукции.

Для проведения ручного УЗК службы неразрушающего контроля оснащены современными дефектоскопами типа USN 52, USN 58 фирмы «Крауткрамер», ЕРОСН ХТ, ЕРОСН 1000i фирмы «Olympus», в том числе с функцией фазированных антенных решеток.

Контроль в потоке производства осуществляется механизированными и автоматизированными средствами контроля. В октябре 2004 года введена в опытно-промышленную эксплуатацию автоматизированная установка УЗК сортового проката «Волна-7», производство компании «Нординкрафт» (г. Череповец.). Автоматизированная установка «Волна-7» предназначена для бесконтактного ультразвукового контроля сплошности основного металла и дефектов поверхности круглого сортового проката диаметром 80...180 мм.

В связи реализацией крупнейшего в металлургической отрасли проекта по строительству рельсобалочного цеха для производства стометровых рельсов ОАО «ЧМК» оснащается линией неразрушающего контроля. Линия состоит из комплекса автоматизированных систем: лазерного измерения сечения рельса, вертикального и горизонтального отклонений, вихретокого и видео контроля поверхностных дефектов, ультразвукового контроля внутренних дефектов, а также системы идентификации рельса и системы маркировки дефектных участков рельсов.

Экономическая эффективность результатов ультразвукового контроля металлопродукции складывается из приплат за проведение УЗК и увеличения объемов производства за счет расширения портфеля заказов. Ежегодная расчетная сумма приплат за проведение УЗК на металлопродукцию, поставляемую на внутренний рынок, составляет 18 млн. рублей в год.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ (СОД-1) УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Кутюрин Ю.Г.¹, Борисенко В.В.¹, Юхацкова О.В.²

¹ОАО «ЦНИИ Специального машиностроения»

Хотьково, Московской обл., Россия

²ООО «НПЦ «Крокус-ПО», Ногинск, Московской обл., Россия

Одним из условий достоверного ультразвукового теневого контроля изделий является соосное расположение ультразвуковых преобразователей. Особенно это важно при контроле крупногабаритных изделий ультразвуковым ручным способом, когда контроль осуществляется двумя операторами, расположенными по разные стороны конструкции и не имеющие возможности визуально наблюдать друг друга.

Различные попытки решения этого вопроса, например, создание специальной геометрической разметки на различных сторонах изделия, применение специальных механических систем и т.п. к положительному результату не приводят.

В связи с этим разработан комплекс технических средств, обеспечивающий ориентацию ультразвуковых преобразователей. Его особенностью является наличие специальных мер защиты системы контроля от помех электромагнитного характера, так как применяется передача сигналов системы ориентации и информационного сигнала по длинным линиям (кабели длиной до 20 м), что повышает требования ко входному тракту дефектоскопа.

Структурная схема технических средств системы ориентации приведена на рис. 1.

Фотография технических средств системы ориентации приведены на фотографии (рис. 2).

Испытания разработанной системы ориентации ультразвуковых преобразователей проводились на образцах изделий рис. 3. Технические характеристики приведены в табл.

Разработанные технические средства успешно прошли испытания и в настоящее время применяются при дефектоскопии крупногабаритных конструкций из ПКМ в цеховых условиях.

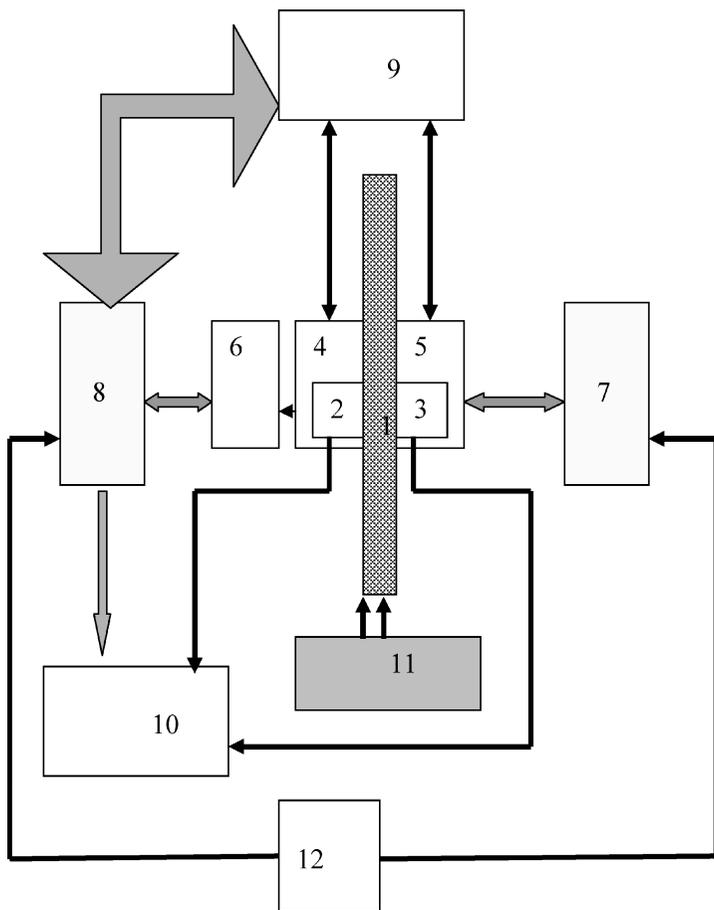


Рис. 1. Структурная схема технических средств системы ориентации:

- 1 – контролируемое изделие; 2 – передающий ультразвуковой преобразователь; 3 – приемный ультразвуковой преобразователь; 4, 5 – приемный и передающий блоки системы ориентации; 6 – блок индикации системы ориентации; 7, 8 – операторы – дефектоскописты; 9 – блок управления системой ориентации; 10 – ультразвуковой дефектоскоп УД2-НПМ; 11 – сканирующая система для перемещения контролируемого изделия; 12 – блок голосовой связи операторов–дефектоскопистов

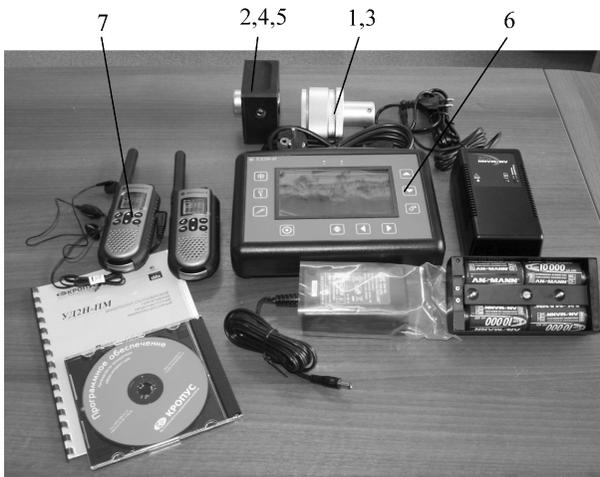


Рис. 2. Фотография технических средств системы ориентации:

- 1 – передающий ультразвуковой преобразователь;
 2 – приемный ультразвуковой преобразователь; 3, 4 – приемный и передающий
 блоки системы ориентации; 5 – блок индикации системы ориентации;
 6 – ультразвуковой дефектоскоп УД2-НПМ; 7 – блок голосовой связи
 операторов-дефектоскопистов



Рис. 3

Технические характеристики

№ п/п	Наименование параметра
1	<p>Состав:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ультразвуковой дефектоскоп УД2-НПМ – 1 компл. – система ориентации СОД-1 (блоки ориентации, управления) – 1 компл. – система голосовой связи – 1 компл. – комплект технической документации (паспорт, техническое описание, инструкция по эксплуатации, конструкторская документация) – 3 компл.
2	Характеристики контроля
2.1	Обеспечен ультразвуковой неразрушающий контроль конструкций из полимерных композиционных материалов, в т.ч. трехслойных конструкций, толщиной 20...120 мм
2.2	Рабочая частота применяемых ультразвуковых преобразователей 50...100 кГц
2.3	В качестве базового использован ультразвуковой дефектоскоп УД2-НПМ, имеющий сертификат соответствия
3	Характеристики системы ориентации
3.1	Погрешность совмещения ультразвуковых преобразователей по двум взаимно перпендикулярным направлениям не более ± 2 мм при максимальной толщине стенки изделия (250 мм)
3.2	Индикация погрешности совмещения посредством световой индикации с указанием направления рассогласования
3.3	Вес приемного и передающего блоков системы ориентации 0,15 кг для каждого блока
3.4	Стабильная голосовая связи между операторами в условиях цеха
3.5	Устойчивая работа при длине линий связи до 40 м в условиях цеха

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕЛЬНОКАТАННЫХ КОЛЕСАХ, БАНДАЖАХ И РЕЛЬСАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Муравьев В.В., Муравьева О.В., Балобанов Е.Н., Волкова Л.В.

*Ижевский государственный технический университет,
Ижевск, Россия*

В ободьях железнодорожных вагонных колес, вследствие механических и физико-химических процессов при изготовлении, формируются остаточные напряжения: вблизи поверхности катания – сжимающие напряжения, уровень которых снижается и переходит в растягивающие по мере приближения к диску колеса. В бандажах, посаженных на центры локомотивных колес, после горячей посадки имеет место более равномерное распределение растягивающих напряжений.

Остаточные напряжения в рельсах возникают после прокатки, объемной закалки, отпуска и последующей правки, и связаны с неодновременным остыванием и структурными превращениями в разных элементах рельса. Дополнительные остаточные напряжения создаются в процессе стыковой сварки рельсов и эксплуатации. Суточные и сезонные циклы изменения температуры, приводят к значительному перераспределению напряжений в железнодорожных рельсах, что может быть причиной появления и роста трещин. В период теплой и особенно жаркой погоды происходит тепловое расширение металла с увеличением растягивающих напряжений в рельсах, что может приводить к авариям. В холодное время года сжимающие напряжения ведут к разрыву рельсов. Для предотвращения и отслеживания этих явлений необходимо оценивать напряжения в рельсах, как на стадии производства, так и при эксплуатации.

В ходе исследований был использован ультразвуковой поляризационно-временной метод измерения напряжений, основанный на измерении разности времен распространения двух сдвиговых волн с взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации, совпадающими с главными напряжениями в анизотропном материале. Разработанная экспериментальная установка, основанная на бесконтактном способе возбуждения и приема поперечных волн с помощью ЭМА преобразователя, обеспечивает инструментальную погрешность измерений времени задержки, не превышающую 0,01 %.

При разработке магнитной системы ЭМА преобразователя был проанализирован ряд конструкций на основе постоянных магнитов, а также магнитная система на базе электромагнита. По результатам исследования магнитного поля этих конструкций установлено, что по характеристикам

равномерности распределения поля и его величины вариант с электромагнитом оказался более предпочтительным. Максимальная регистрируемая величина поля нормальной составляющей вектора магнитной индукции в среднеуглеродистой стали составляет около 2,7 Тл при воздушном зазоре 0,5 мм между полюсом магнита и поверхностью ввода. Специализированное программное обеспечение позволяет одновременно наблюдать на мониторе компьютера эхограммы многократных переотражений двух поперечных волн и с необходимой точностью определять разность времен прихода.

Обследованы новые цельнокатанные колеса производства ВМЗ и НТМК марки 2 и Т, а также бывшие в эксплуатации; бандажи для локомотивных колес до упрочнения и после электро-контактного упрочнения, фрагменты рельсов после эксплуатации.

Значения сжимающих напряжений у поверхности катания исследованных 14-ти цельнокатанных колес производства ВМЗ в основном не превышают допустимые и находятся в диапазоне 100...160 МПа. Распределение остаточных напряжений по окружности обода для новых колес достаточно однородно (не превышает 40 МПа). В колесах повышенной твердости, бывших в эксплуатации, наблюдается неравномерное распределение напряжений по окружности обода (разница между минимальным и максимальным значением напряжений по окружности может достигать ~60 МПа).

По результатам исследований 7 ободьев цельнокатанных колес в колесобандажном цехе Нижнетагильского металлургического комбината, значения остаточных напряжений не превысили уровень 190 МПа. В ряде колес отсутствует точка перехода через ноль. Влияние фактора анизотропии учли путем измерений задержки импульса на вырезанных из цельного колеса фрагментах ободьев.

В бандажах локомотивных колес посаженных на центры с удалением от поверхности катания растягивающие напряжения растут как в неупрочненных, так и в упрочненных колесах и достигают величин от 150 до 250 МПа на глубине 55 мм. Вблизи поверхности катания (25 мм) наблюдается снижение остаточных напряжений от 150...200 МПа на неупрочненных колесах до 50 МПа и менее после упрочнения поверхности.

Произведена оценка остаточных напряжений ЭМА методом по высоте рельса и с боковой поверхности шейки рельса. В табл. 2 приведены результаты расчета продольных напряжений в шейке рельса и значения сжимающих напряжений при измерениях со стороны головки рельса. Полученные значения напряжений (до -250 МПа) совпадают с результатами Калакуцкого-Закса-Давиденкова.

Опробованная экспериментальная методика позволяет с необходимой точностью оценивать уровень остаточных напряжений, глубину зоны перехода сжимающих напряжений в растягивающие, толщину объекта контроля.

1. Результаты оценки остаточных напряжений

№ колесной пары	Заводской номер бандажа	Описание измерения		Расстояние от поверхности катания, мм					
				до упрочнения σ , МПа			после упрочнения σ , МПа		
		Кол-во сечений	Кол-во точек в сечении	25	40	55	25	40	55
1796	40368	8	3	112	175	183	23	109	177
	40454	8	3	158	197	235	36	195	221
3543	55507	8	3	191	231	255	51	183	222
	55621	8	3	110	151	171	49	118	146
1013	55564	8	3	131	151	188	39	121	157
	55561	8	3	97	104	126	26	86	118
4653	55539	8	3	165	160	173	44	162	171
	55615	8	3	114	132	149	18	107	128

2. Результаты расчета

№ сечения в рельсе	Напряжение, МПа	
	По высоте рельса, $h = 180$ мм	По толщине шейки, $b = 18$ мм
1	-24	-229
2	-27	-233
3	-34	-206
4	-28	-242
5	-30	-229

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)» (Рег. номер: 2.1.2/12069).

ВОЗМОЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОСЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Сучков Г.М.¹, Петрищев О.Н.², Мирошников В.В.²,
Хашина С.В.², Маслова М.С.²

¹НТУ «ХПИ», Харьков, Украина

²НТУ «КПИ», Киев, Восточно-украинский университет
им. В. Даля, Луганск, Украина

Доклад посвящен вопросам ультразвукового контроля железнодорожных осей, к которым предъявляются высокие требования в отношении их качества и, в первую очередь, к наличию внутренних и поверхностных дефектов, а также к структуре металла. Практически 100 % железнодорожных осей на наличие внутренних дефектов и соответствие структуры выполняют путем применения акустических (ультразвуковых) методов контроля. Чаще всего для обнаружения и оценки структуры металла используют контроль импульсами продольных ультразвуковых колебаний, направляемых нормально поверхности оси [1–2]. В некоторых странах дополнительно для обнаружения внутренних дефектов используют импульсы сдвиговых (поперечных) ультразвуковых колебаний вводимых в железнодорожную ось под углом к поверхности металла [2]. Так обеспечивается контроль объемов металла в зонах изменения диаметра оси. Во время контроля ось сканируют по всей ее поверхности, что обеспечивается вращением ультразвуковых преобразователей вокруг оси или вращением самой оси. Как правило, требуется проводить ультразвуковую дефектоскопию за счет использования иммерсионного эхо импульсного метода контроля [1]. При этом ось погружается в очищенную от примесей деаэрированную воду с добавками ингибиторов, которые уменьшают коррозию поверхности железнодорожной оси. Недостатки такого метода контроля известны [3].

Нами предложено заменить традиционный метод ультразвукового контроля на бесконтактный с применением электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов. На сегодняшний день чувствительность ЭМА способа при контроле акустически относительно прозрачных металлов соответствует чувствительности традиционного контактного метода, например, позволяет уверенно обнаруживать плоскодонный отражатель диаметром 1 мм на дальности около 170 мм [4–5]. Наиболее полная схема контроля объема оси приведена на рис. 1.

Во многих случаях целесообразно контролировать оси только одним прямым ЭМА преобразователем (ЭМАП), что значительно упрощает контроль и удешевляет установку.

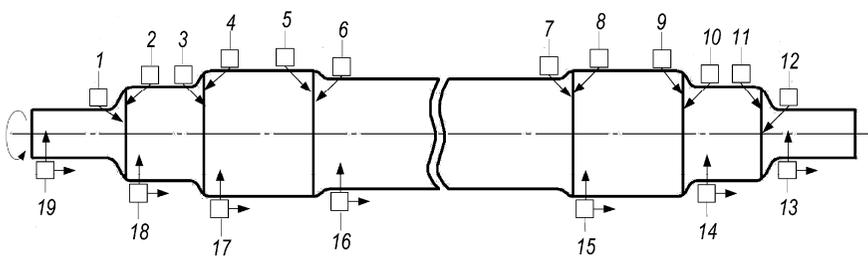


Рис. 1. Схема контроля оси прямыми и наклонными ЭМАП

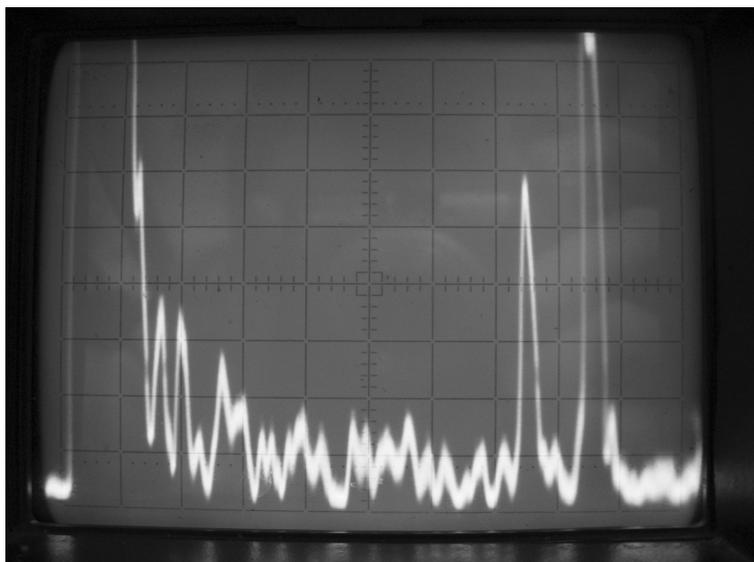


Рис. 2. Реализация с эхо импульсом от плоскодонного отражателя диаметром 1 мм, выполненном в образце оси на глубину 20 мм

Как известно, для обеспечения необходимой чувствительности ЭМА контроля целесообразно увеличивать индукцию постоянного магнитного поля и напряженность высокочастотного электромагнитного поля, создаваемых ЭМАП в зоне контроля. Современные постоянные магниты на ос-

нове редкоземельных элементов практически исчерпали свои возможности, формируя поля с индукцией до 1,3 Тл [4]. Поэтому перспективным направлением повышения чувствительности ЭМА контроля является повышение импульсной мощности генератора, питающего электромагнитно-акустический преобразователь. При этом необходимо выполнить ряд требований: формировать в низкоомной нагрузке импульсы тока, пиковое значение которого должно превышать 100...200 А; импульсы должны формироваться в виде пакетов с заданным частотным заполнением (до 5 МГц – для продольной волны и 3 МГц – для сдвиговой волны); частота следования зондирующих импульсов должна обеспечивать контроль объема металла оси без пропусков; напряжение электропитания выходных каскадов не должно быть опасным для обслуживающего персонала. Такой генератор был разработан. При этом, кроме указанных характеристик он имеет защиту от короткого замыкания питающих ЭМАП цепей и перегрева элементов выходного каскада усиления. Напряжение питания цепей генератора не превышает 35 В. На основе нового генератора был изготовлен макет устройства для контроля железнодорожных осей. Исследование его возможностей показал, что он позволяет выполнить максимальное требование нормативно-технической документации и выявлять внутренние дефекты, эквивалентные плоскодонному отражателю диаметром 1 мм и более, рис. 2 при контроле прямым ЭМАП. На рис. 2 – слева – зондирующий импульс; справа – донный импульс; между ними – эхо-сигнал от плоскодонного отражателя.

Вывод. Установки с ЭМАП могут эффективно заменить иммерсионные установки для контроля железнодорожных осей.

Литература

1. <http://www.ndtrade.ru>.
2. **СТО РЖД 1.11.001–2005.** Методические указания по приемочному ультразвуковому неразрушающему контролю осей колесных пар подвижного состава. М. 2005. 36 с.
3. **Неразрушающий контроль:** Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
4. **Сучков Г.М.** Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів. Автореф. дис. д.т.н., Харків, НТУ «ХП», 2005. 37 с.
5. **Петрищев О.Н.** Теоретичні основи розрахунку та проектування ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу. Автореф. дис. д.т.н., Київ, НТУУ «КПІ», 2009. 36 с.

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ УЗП ПРИ КОНТРОЛЕ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Модин А.Ю.
СамГТУ, Самара, Россия

Доклад посвящен созданию аппаратно-программного комплекса сбора и обработки информации в процессе ультразвукового контроля трубных проводок контрольно-измерительных приборов. Программная часть на первом этапе была представлена в виде алгоритма и на сегодняшний день реализована в математическом пакете MATLAB. К аппаратной части относятся видео аппаратура и планарный оптический датчик перемещения для позиционирования ультразвукового преобразователя. Суть работы комплекса заключается в следующем (рис. 1). Камера снимает экран дефектоскопа и посылает снимок компьютеру. Он, получив изображение, проводит анализ снимка и извлекает из него амплитуду эхо-сигнала и время прохождения ультразвуковой волны в объекте контроля. Чтобы привязать полученные амплитуду и время к определенной точке на объекте контроля, используется оптический датчик относительного перемещения для ультразвукового преобразователя (УЗП). Датчик перемещения жестко соединен с УЗП. Измерение смещения УЗП и запуск съемки экрана дефектоскопа синхронизирован ЭВМ. Сбор и обработка данных происходит в реальном масштабе времени.

При использовании аппаратно-программного комплекса результатом проведенного УЗК будет запись всех зафиксированных эхо-сигналов, по-

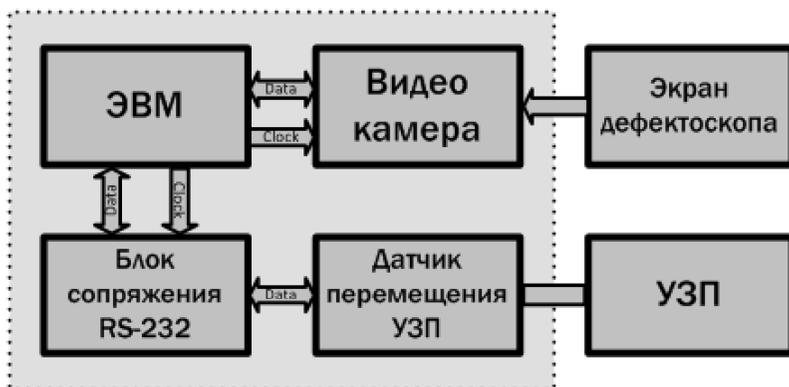


Рис. 1. Блок схема аппаратно-программного комплекса сбора и обработки акустической информации

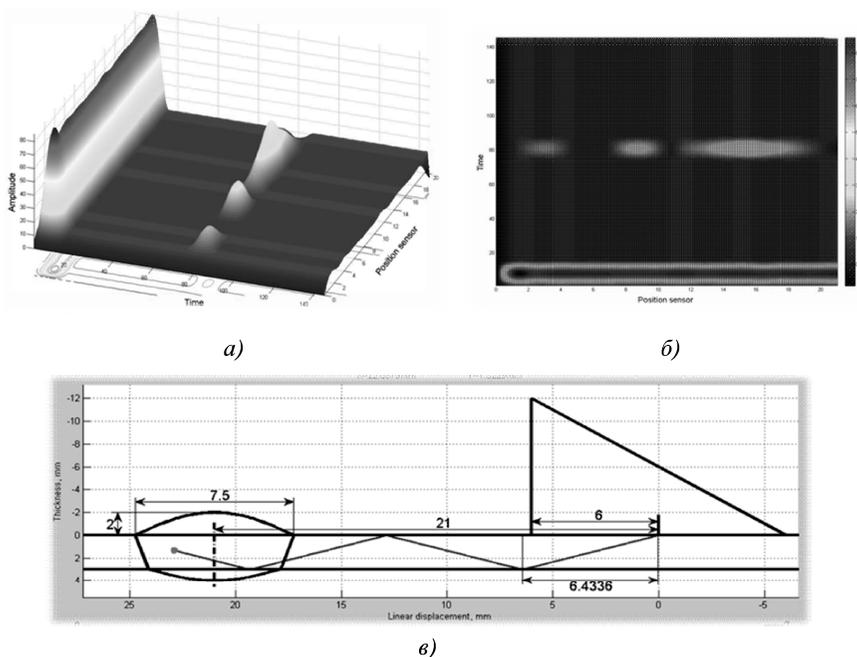


Рис. 2. Компьютерные ультразвуковые изображения:
a – квазитрехмерное изображение; *б* – полутоновое изображение;
в – *W*-изображение

павших в стробируемую область экрана дефектоскопа со всеми необходимыми параметрами для их последующей идентификации, а именно: амплитуда, время и положение УЗП в этот момент на объекте контроля. Используя полученные данные, программа строит различные виды изображений, такие как *W*-развертка, полутоновые изображения дефектных зон и квазитрехмерные изображения (рис. 2).

Сегодня появляется новое направление в ультразвуковой дефектоскопии – ультразвуковая дефектометрия. В ней имеют дело не с эквивалентными и условными размерами обнаруживаемых дефектов, а с их реальными размерами. Одним из способов достижения данной цели – это реализация алгоритма фокусированной синтезированной апертуры (SAFT). Созданный аппаратно-программный комплекс имеет все, чтобы реализовать этот и многие другие алгоритмы обработки полученной информации.

Библиографический список

1. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / Под ред. Вopilкина А.Х. – М.: Машиностроение, 2008. 368 с.

2. Модин А.Ю. Автоматизированная система обработки акустических сигналов при диагностике сварных соединений // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010). Труды Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – Самара, 2010. 977 с.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ФАЗИРОВАННЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ

Коновалов Н.Н.¹, Мелешко Н.В.²

¹ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия

²НУЦ «КАСКАД» МГУПИ, Москва, Россия

В докладе рассмотрен способ определения размеров плоскостных (трещин, непроваров, несплавлений) дефектов по дифракционным полям рассеяния при использовании ультразвуковых фазированных антенных решеток. Указаны особенности интерпретации образов сигналов. Приведены примеры изображения имитаторов вертикальных трещин и реальных дефектов. Показано, что используемый в настоящее время амплитудный критерий оценки дефектов не всегда позволяет принять правильное решение о годности изделия.

В докладе отмечено, что наиболее распространенным и востребованным физическим методом неразрушающего контроля является ультразвуковой метод (УЗК), к одному из главных преимуществ которого можно отнести высокую вероятность выявления наиболее опасных плоскостных дефектов: трещин, непроваров и несплавлений. Недостатком УЗК, кроме необходимости разработки специальных методик и технологических карт при дефектоскопии изделий различных типов, является сложная интерпретация результатов контроля.

Отмечено, что анализ измерений поля позволяет сделать заключение о размерах, форме и ориентации выявленной несплошности. Когерентные методы реализуются в приборах, работающих с ультразвуковыми фазированными антенными решетками (ФАР).

Наиболее востребованными преимуществами дефектоскопов с ФАР являются при осуществлении эксплуатационного неразрушающего контроля, так как расширяются возможности по оценке степени опасности дефектов, возникших в процессе эксплуатации оборудования.

Приведена оценка достоверности НК при использовании ФАР.

СПОСОБ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Курашкин К.В., Мишакин В.В.

*НФ Института Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Н. Новгород, Россия*

В докладе рассматривается актуальная задача оценки остаточных механических напряжений в сварных соединениях труб. Известно, что остаточные сварочные напряжения являются одной из основных причин вызывающих коррозионное растрескивание трубопроводов.

В настоящее время для определения напряженного состояния металлических конструкций активно применяется ультразвуковой эхо-метод неразрушающего контроля. Среди преимуществ, благодаря которым эхо-импульсный метод находит широкое применение, простота и оперативность контроля, высокая точность измерений, возможность работы при одностороннем доступе к объекту, низкая стоимость и безопасность для персонала. Применение акустического метода для определения напряженного состояния материала основано на эффекте акустоупругости, который отражает нелинейную связь между напряжениями и деформациями и, как следствие, влияние напряжений на скорости распространения упругих волн. Методом акустоупругости можно определить одноосные и двухосные механические напряжения. Однако существующие алгоритмы оценки напряжений с помощью ультразвука требуют проведения измерений на разгруженном объекте или на образцах, вырезанных из исследуемой конструкции. Проблема безнулевой акустической тензометрии остается открытой.

В настоящей работе проводились акустические исследования сварных соединений разных конструкционных сталей. На рис. 1 показана связь коэффициентов Пуассона ν_{31} и ν_{32} основного металла стали 09Г2С и стали 35. На рис. 2 представлена взаимосвязь коэффициентов Пуассона ν_{31} и ν_{32} в элементе трубы магистрального газопровода со сварными швами.

Коэффициенты Пуассона ν_{31} и ν_{32} рассчитывались через измеренные времена распространения поперечных и продольных упругих волн по следующим формулам:

$$\nu_{31} = \frac{0,5 - (V_1/V_3)^2}{1 - (V_1/V_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_1)^2}{1 - (t_3/t_1)^2}, \quad \nu_{32} = \frac{0,5 - (V_2/V_3)^2}{1 - (V_2/V_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_2)^2}{1 - (t_3/t_2)^2}.$$

где V_1 и V_2 – скорости, а t_1 и t_2 – времена распространения поперечных волн, поляризованных вдоль соответствующих осей ортотропного листового материала; V_3 и t_3 – скорость и время распространения продольной волны.

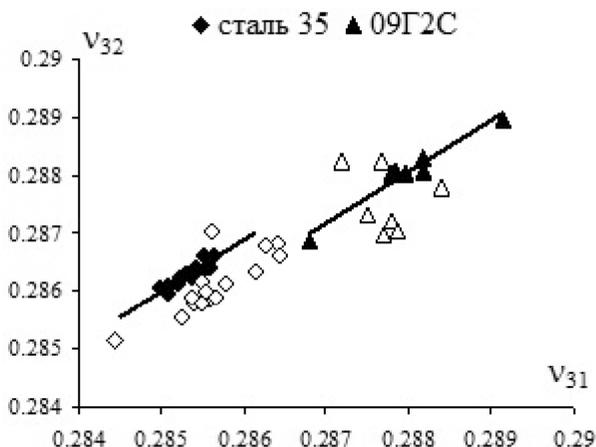


Рис. 1. Взаимосвязь коэффициентов Пуассона в сварных образцах

Связь коэффициентов Пуассона определяется особенностями формирования текстуры проката листового сплава и влиянием остаточных напряжений. В отсутствие напряжений коэффициенты Пуассона линейно связаны (черные точки). Присутствие остаточных сварочных напряжений приводит к отклонению точек $\{v_{31}; v_{32}\}$ от прямой линии (белые точки). Величина отклонения точек $\{v_{31}; v_{32}\}$ от исходной прямой линии определяется уровнем остаточных напряжений.

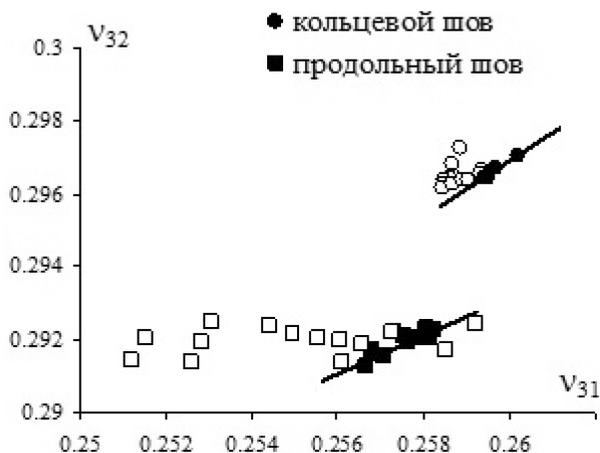


Рис. 2. Взаимосвязь коэффициентов Пуассона в материале трубы

На основании проведенных исследований, нами предлагается способ оценки уровня остаточных механических напряжений в основном металле сварного соединения в режиме безнулевой акустической тензометрии. Способ основывается на анализе коэффициентов Пуассона, измеряемых ультразвуковым эхо-методом. Уровень остаточных напряжений определяется по величине отклонения точек $\{v_{31}; v_{32}\}$ от прямой зависимости.

Использование предлагаемого алгоритма позволяет осуществлять оперативный контроль уровня остаточных напряжений непосредственно на объекте с помощью измерения времени распространения объемных упругих волн. Алгоритм был опробован на сварных соединениях в элементе трубы магистрального газопровода. Исследование коэффициентов Пуассона позволило разделить зоны материала, в которых присутствуют и отсутствуют остаточные

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ И НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Чуприн В.А.

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

Доклад посвящен вопросам применения поверхностных и нормальных волн для определения вязкости и плотности технологических жидкостей.

Непрерывные измерения параметров жидкостей находят широкое применение как в системах управления технологическими процессами производства (химическая, пищевая, нефтеперерабатывающая и др. отрасли промышленности), так и в аппаратуре для мониторинга качества технологических жидкостей в процессе их эксплуатации (металлообработка, двигатели внутреннего сгорания и др.). В качестве информативных физических параметров жидкостей наиболее часто используются сдвиговая вязкость η_s , плотность ρ , оптические коэффициенты преломления, диэлектрическая проницаемость.

Интерес к разработке средств измерения параметров технологических жидкостей с помощью ультразвука, в первую очередь, связан со сравнительной простотой автоматизации ультразвуковых измерений и их интегрирования в технологические процессы. Физической основой построения таких приборов является зависимость измеряемых параметров ультразвуковых колебаний в жидкостях – скорость распространения c_l , коэффициент затухания α_l , коэффициенты отражения R от сред с известными акустическими характеристиками – от таких физических характеристик жид-

костей как плотность и сдвиговая вязкость. Однако вычисление с необходимостью для технических применений точностью абсолютных значений этих параметров из акустических экспериментальных результатов связано с определенными трудностями. Во-первых, все параметры, описывающие распространение ультразвуковых волн в жидкостях, зависят одновременно от нескольких параметров жидкости:

$$c_l = 1/(\rho\beta_0)^{1/2}; \quad \beta_0 = \beta_\infty + \beta_{rel}.$$

$$\alpha_l = \omega^2[4\eta_S / 3 + \eta_B / (1 + \omega^2\tau^2)] / 2\rho c_l^3.$$

Здесь β_0 , β_∞ , β_{rel} – равновесная, мгновенная и релаксационная сжимаемости жидкости соответственно; ω – круговая частота; η_B – объемная вязкость жидкости.

Во-вторых, в общем случае входной импеданс жидкости для продольных волн Z_l является комплексным числом и зависит от плотности и от сдвиговой и объемной вязкостей:

$$Z_l = \rho c_l [1 + i\omega(4\eta_S / 3 + \eta_B / (1 + \omega^2\tau^2)) / \rho c_l^2],$$

$i = \sqrt{-1}$. Поэтому коэффициенты отражения/преломления также будут комплексными числами. Численные оценки показывают, что для измерений плотности с погрешностью $\approx 1\%$ вкладом зависимости $R_l(\eta_S, \eta_B)$ можно пренебрегать только в маловязких жидкостях с вязкостями, не превышающими 1 Пуаз, и на частотах, не превышающих единицы мегагерц. При этих условиях, измеряя R_l и c_l , можно рассчитать плотность исследуемой жидкости. Однако, вязкость технологических жидкостей, применяемых для многих практически интересных случаев, оказывается существенно выше. Измерения импеданса продольных волн должны быть дополнены измерениями импеданса жидкости для сдвиговых волн Z_S ($Z_S = \sqrt{i\omega\rho\eta_S}$) и коэффициента затухания звука в жидкости α_l .

В результате таких акустических измерений для дальнейшей обработки имеются три независимых уравнения с тремя неизвестными ρ , η_B , η_S .

Общим недостатком такого подхода является невысокая точность измерений, обусловленная сравнительно малым влиянием обоих импедансов на измеряемые коэффициенты отражения, так как Z_l и Z_S много меньше волновых импедансов продольных и сдвиговых волн твердого тела

(Z_l^W, Z_s^W) , граничащего с жидкостью. Отношение волновых импедансов особенно мало для сдвиговых волн ($\approx 0,01$), что делает подобные измерения в нижнем мегагерцевом диапазоне практически невозможными. Попытки повышения точности измерения волновых импедансов жидкости путем выбора твердых тел с малыми волновыми импедансами наталкиваются на необходимость учета комплексности волновых импедансов таких тел.

Альтернативным путем повышения точности измерения продольного и сдвигового импеданса жидкостей является замена объемных волн, отражающихся от границы твердое тело/жидкость поверхностными и нормальными волнами, распространяющиеся вдоль такой границы. Повышение разрешающей способности при таком подходе обусловлено тем, что в этом случае в отличие от объемных волн область взаимодействия волны с жидкостью не ограничивается площадью ультразвукового пучка, а распространяется на весь путь пробега волны L . Можно показать, что уменьшение амплитуды принятого сигнала оказывается пропорциональным $\exp(-Z_l L / Z_l^W \delta)$ для поверхностных (ПВ) и вертикально поляризованных нормальных волн (ВПНВ) и пропорциональным $\exp(-Z_s L / Z_s^W \delta)$ для горизонтально поляризованных нормальных волн (ГПНВ) (под δ понимается либо глубина проникновения ПВ либо толщина твердотельной пластины для ВПНВ/ГПНВ). Так как легко выполнить условие $L \gg \delta$, то чувствительность и разрешающая способность измерений импедансов жидкостей заметно возрастает и дает возможность измерять вязкости маловязких жидкостей и в нижнем мегагерцевом диапазоне.

Для определения наиболее подходящих для промышленных условий способов возбуждения/приема ПВ, ВПНВ и ГПНВ исследовалось применение пьезопластин X - и Y -срезов, приклеенных либо непосредственно к твердому телу (за счет коэффициента Пуассона) либо к призме, обеспечивающей оптимальный угол ввода колебаний. Измерения проводились на частотах 2,0...3,0 МГц с использованием генератора ударного возбуждения. Для измерения амплитуды сигналов между полосовым усилителем и преобразователем располагался аттенуатор с разрешающей способностью $\pm 0,1$ дБ. Эксперименты показали, что для измерений продольного импеданса могут быть эффективно использованы как ПВ, так и нулевые моды симметричной и антисимметричной ВПНВ. Применение призм дает выигрыш в амплитудах принимаемых сигналов до 20 дБ. Однако информативные сигналы на всех исследованных типах ПВ и ВПНВ и способах возбуждения сопровождаются помехами, имеющими различную физическую природу. Поэтому схема акустического тракта требует оптимизации в зависимости от конкретной измерительной задачи (допустимая погрешность измерений, геометрическая длина контакта твердое тело/жидкость и т.д.). Как показали эксперименты, наилучшие результаты измерений сдвигового им-

педанса жидкости дает применение нулевой моды ГПНВ, на которой отсутствуют какие-либо мешающие сигналы. Так, в этом случае удастся реализовать измерения сдвигового импеданса дистиллированной волны на сравнительно низких частотах (порядка 2 МГц). Последнее обстоятельство увеличивает возможности технических применений таких измерений, так как толщина слоя жидкости χ ($\chi = \sqrt{2\eta_s / \rho\omega}$), в котором измеряется вязкость, для маловязких жидкостей на частоте 2 МГц не превышает 1 мкм.

СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Тарабрин В.Ф., Одынец С.А., Бугаенко В.М., Кононов Д.А.,
Чистякова О.Е., Главатский Д.А.

ЗАО «Фирма ТВЕМА», г. Москва, Россия

Трудно переоценить влияние качества акустического контакта на результаты ультразвуковой дефектоскопии. Особенно, если речь идет о проведении контроля рельсов ультразвуковым методом мобильными средствами дефектоскопии на высоких скоростях.

Применяемые в настоящий момент способы слежения за качеством акустического контакта обеспечиваются реализацией следующих двух алгоритмов:

1. Выделяют временную зону, в которой регистрируются сигналы от конструктивных отражателей (болтовые и штепсельные отверстия, торцы, нижняя поверхность подошвы рельсов), затем по уменьшению амплитуды сигналов от конструктивных отражателей судят о качестве акустического контакта.

2. Дополнительно выделяют временную зону за пределами рабочей зоны (зоны контроля). В этой дополнительной зоне увеличивают чувствительность и регистрируют сигналы, обусловленные структурой металла и диффузным (ненаправленным) отражением от поверхностей контролируемого изделия. В этой зоне увеличивают чувствительность. По уменьшению амплитуды сигналов в дополнительной зоне судят о качестве акустического контакта.

Реализация рассматриваемого в докладе способа базируется на использовании дефектоскопов со значительным динамическим диапазоном, позволяющим на условной (поисковой) чувствительности фиксировать сигналы от структуры металла рельса (сигналы небольшой амплитуды). Такого типа дефектоскопы разрабатываются и изготавливаются ГК «ТВЕМА».

Новый способ заключается в расчете среднего значения амплитуд сигналов в каждом цикле излучения/приема в рабочей временной апертуре, выборе оптимальной разницы между рассчитанным средним значением и амплитудой сигнала от дефекта для каждого типа ПЭП, обеспечивающей надежное выявление дефектов. Исходя из выполнения вышеуказанного условия и динамического диапазона регистрируемых сигналов устанавливается критерий минимально допустимого значения среднего значения амплитуд сигналов как критерий наличия акустического контакта для всех типов ПЭП.

Преимуществами рассматриваемого способа контроля качества акустического контакта являются:

1. Возможность слежения за качеством акустического контакта непосредственно в процессе проезда.

2. Возможность слежения за качеством акустического контакта не в специально выбранной зоне, а в рабочей, что исключает искажение результатов.

3. Возможность реализации автоматического слежения за качеством акустического контакта.

4. Возможность автоматической корректировки чувствительности в зависимости от качества акустического контакта.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

Бойчук А.С.

ФГУП «ВИАМ», Москва, Россия

Доклад посвящен очень важной и актуальной на сегодняшний день задаче, неразрушающему контролю (НК) полимерных композиционных материалов (ПКМ), в особенности углепластиков, применяемых в деталях и конструкциях современной авиационной техники.

В процессе производства деталей и конструкций из ПКМ – при несоблюдении режимов подготовки исходного сырья, нарушении технологических режимов изготовления, а также в процесс эксплуатации – при несоблюдении режимов эксплуатации, влиянии окружающей среды, появляются различного рода дефекты, которые в той или иной степени оказывают

влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства готового изделия.

Во ФГУП ВИАМ решению задачи по контролю ПКМ уделяется огромное внимание. Разработан и выпущен ряд нормативных документов с использованием ультразвуковых методов НК, таких как метод прохождения, эхо-метод, велосиметрический, импедансный и др. Все разработанные методики и средства в различной степени позволяют выявлять те или иные типичные производственные и эксплуатационные дефекты ПКМ.

В докладе обсуждаются результаты проведенных во ФГУП ВИАМ исследований по НК ПКМ с использованием оборудования на фазированных решетках. В одном из них использовался ультразвуковой дефектоскоп-томограф A1550 «IntroVisor» на фазированных решетках, разработанный российским производителем ООО «АКС». Исследования проводились на плоских панелях из углепластика простой формы и с небольшой кривизной поверхности, а также на фрагменте интегральной конструкции со стрингерами. Для этого использовались 16-ти элементная антенная решетка продольных волн с рабочей частотой 3,5 МГц и прямая призма из полистирола. Благодаря использованию призмы мертвая зона при контроле составила 0,5 мм с обеих сторон контролируемого изделия. Достигнутая чувствительность контроля позволила надежно выявлять дефекты в виде диска диаметром 10 мм (0,8 см²). В отличие от традиционных методов НК, результаты контроля представлялись в виде В-скана, что значительно облегчало интерпретацию внутреннего состояния объекта контроля. В результате была показана возможность выявления дефектов (несплошностей) типа расслоений, непроклеев, посторонних включений, трещин, преимущественно ориентированных параллельно поверхности ввода ультразвуковых колебаний.

В другом исследовании использовался один из самых распространенных за рубежом дефектоскопов на фазированных решетках OmniScan от компании Olympus NDT. С дефектоскопом были использованы иммерсионный преобразователь 5CC10.2-16-16x5-R1-P-2.5-OM, на частоту 5 МГц, а также преобразователь 5L64-64x7-NW1-P-5-OM на частоту 5 МГц и кусок аквалена толщиной 25 мм (использовался в качестве задержки). Исследования также как и в работе с использованием дефектоскопа-томографа A1550 «IntroVisor» проводились на плоских панелях из углепластика простой формы и с небольшой кривизной поверхности, а также на фрагменте интегральной конструкции со стрингерами. Показана возможность выявления несплошностей типа расслоений и непроклея с различной ориентацией относительно поверхности ввода ультразвуковых колебаний.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ ПО ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА

Юхацкова О.В., Муханов Е.Е.

*ОАО «ЦНИИ Специального Машиностроения»
Хотьково, Московской обл., Россия*

При ультразвуковом (УЗ) контроле качества изделий из композитов в качестве информационного признака о дефекте помимо амплитуды сигнала может служить и время прохождения сигнала от излучающего преобразователя к приемному. Обычно значение времени распространения сигнала определяют перед проведением контроля на тест-образцах, используя известные УЗ-эхо-импульсный или УЗ-теневого методы измерений. Однако при контроле протяженных конструкций с односторонним доступом измерение эхо-импульсным методом становится проблематичным из-за высокого затухания акустических колебаний. Для измерения времени прохождения УЗ-колебаний в крупногабаритных изделиях теневым методом необходимо обеспечить соосность расположения излучающего и приемного датчиков, что достаточно сложно обеспечить, например, при контроле сетчатых конструкций. Как правило, в этих случаях можно использовать косвенный метод измерения скорости продольных волн, описанный в ГОСТ 17624–87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности», заключающийся в том, что проводится измерение скорости поверхностных колебаний, и по измеренной величине $t_{\text{пов}}$ определяют значение времени распространения продольных колебаний по формуле: $t_{\text{про}} = K \cdot t_{\text{пов}}$. Однако при таком измерении следует учитывать, что физико-механические свойства материалов на поверхности и в толще материала могут значительно различаться. Величина этих различий должна быть определена на стадии отработки методики контроля с целью исключения ошибок в интерпретации результатов измерений.

При контроле сетчатых конструкций использовался «условно теневой» способ.

Схема расположения преобразователей такого способа приведена на рис. 1. Следует отметить, что реализовать способ можно только с использованием преобразователей, имеющих широкий (не менее 90°) угол раскрыва диаграммы направленности (ДН).

В результате такого расположения преобразователей УЗ-сигнал проходит не только через поверхностные слои, но и «через внутреннюю область» контролируемого изделия, что позволяет измерять время распространения ультразвука непосредственно в толще материала. Расстояния L_1

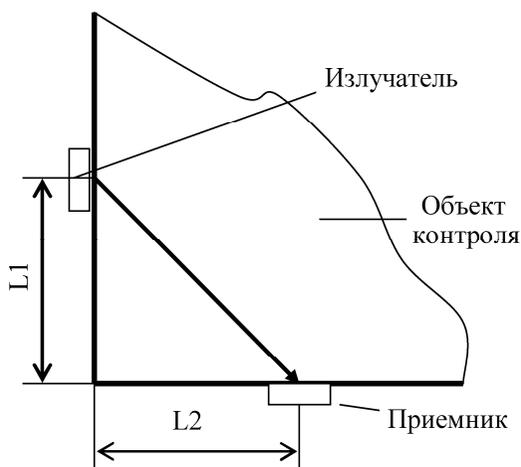


Рис. 1. Расположение излучающего и приемного преобразователей с широкой диаграммой направленности относительно двугранного угла протяженного дефекта

и L_2 необходимо выбирать исходя из значения величины затухания УЗ в материале изделия и формы диаграммы направленности датчиков. На рис. 2 показана форма сигнала на приемном преобразователе при реализации указанной схемы прозвучивания, на рис. 3 – представлена схема прозвучивания в реальных условиях. При наличии дефекта (или полного разрыва ребра) по линии А–А (рис. 3), время распространения сигнала от излучающего преобразователя до приемного существенно увеличится, что и будет зафиксировано как дефект.

Многочисленные колебания после прихода информационного сигнала в момент времени t_1 объясняются многократными переотражениями УЗ-зондирующего сигнала на элементах структуры (структурный шум). Эти коррелированные с зондирующим сигналом помехи появляются после информационного сигнала, прошедшего по наикратчайшему пути от ИП до ПП, в то время как все остальные переотражения прошли больший путь по сравнению с информационным сигналом. Тем самым, при теновом прозвучивании сложноструктурного изделия сложной формы коррелированные шумы и помехи приходят позже информационного сигнала и не влияют на результаты измерений.

Следует отметить, что в предлагаемом методе (как и в иных известных методах определения скорости акустических колебаний) необходимо учитывать возможные погрешности определения скорости:

1) Погрешность, связанная с задержкой УЗ-сигнала в акустическом тракте преобразователей $\Delta t_{\text{зад}}$.

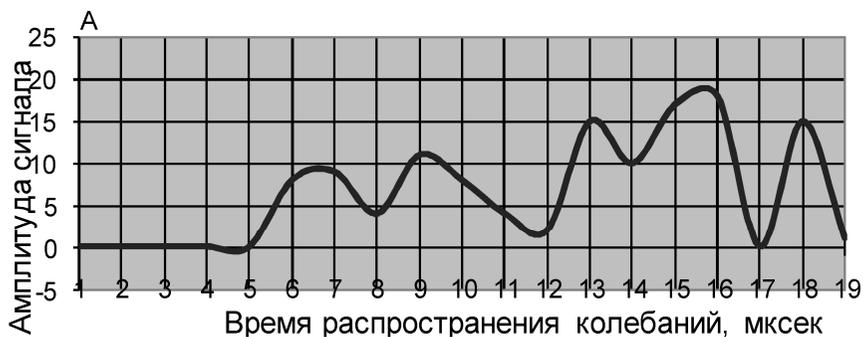


Рис. 2. Сигнал на приемном преобразователе при прозвучивании изделия через двугранный угол

2) Погрешность, связанная с различным качеством контакта между преобразователями и поверхностью объекта (влечет за собой разные значения задержки в акустическом тракте в каждом конкретном случае контакта преобразователей с поверхностью объекта).

3) Погрешность, связанная с возможной неоднородностью объекта контроля – при различных положениях преобразователей на двугранном угле объекта возможно получение отличающихся значений скорости УЗ-волн.



Рис. 3. Способ двугранного угла применительно к сетчатым структурам. Белая линия – предположительно путь «обхода» УЗ-колебаний при нарушении сплошности по сечению А-А

Влияние последних двух погрешностей необходимо минимизировать за счет проведения нескольких измерений значений скорости звука и последующим их усреднением $c_{\text{сред}} = \sum_i^N c_i$.

Погрешность, связанная с задержкой в акустическом тракте (в УЗ-преобразователях) может быть устранена при проведении измерений при двух различных положениях одного из датчиков (например, при $L_1 = L_2 = L$ и при $L_1 = L + \Delta L$). В первом случае справедливы выражения: $H_2 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2} = \sqrt{(L + \Delta L)^2 + L_2^2}$.

При УЗ-контроле изделий из сложноструктурных материалов возникает проблема обнаружения и измерения информационных сигналов (амплитуды, времени распространения) на фоне многочисленных переотражений на элементах структуры. Как показано выше, наименее всего подвержен воздействию случайных помех передний фронт сигнала, однако дисперсия скорости и большое затухание могут оказать существенное влияние на его положение и скорость нарастания. Переотражения акустических сигналов практически во всех случаях являются помехой, маскирующей и искажающей полезные информационные сигналы, из-за чего их называют структурным шумом.

Характеристики структурного шума отличаются от характеристик известных в радиотехнике помех типа «белый шум». Так как структурный шум является следствием взаимодействия зондирующего сигнала с материалом контролируемого изделия, его часто называют коррелированной помехой, полагая, что структурный шум имеет такой же частотный спектр, что и зондирующий сигнал. По этой причине выделить полезный информационный сигнал из коррелированного с ним структурного шума удается только после разделения (декорреляции) искомого сигнала от дефекта и сигнала структурной помехи. Декорреляцию сигналов структурного шума и полезного сигнала возможно осуществить при одноканальном контроле с использованием частотных методов фильтрации при наличии существенных различий в спектрах помехи и полезного сигнала.

Обеспечить более полное разделение искомого полезного сигнала и сигнала помехи, и тем самым повысить отношение сигнал/шум, возможно с помощью пространственной обработки сигналов.

Так как структурные неоднородности распределены в объеме случайно, то отражения от них, образующие структурный шум, также будут случайно распределены во времени. В этой ситуации при наличии сигнала от дефекта в соседних пространственных каналах при накоплении N реализаций сигнал от дефекта изменяется в N раз, а сигнал структурного шума – в $N^{0,5}$.

Нетрудно показать, что если скорость волны на конкретном пути распространения отличается от c_0 , то отклонение фазы от нулевого значения будет равно

$$\Delta\varphi = -2\pi \frac{l}{\lambda_0} \frac{\Delta c}{c_0}.$$

Применяя эту формулу, нетрудно рассчитать погрешность измерения времени распространения сигнала через изделие для конкретных условий.

Среднее значение просуммированного сигнала в момент времени, когда это значение максимально или близко к максимальному.

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^N A \cos \varphi_i = NA \int_{-\infty}^{\infty} \cos \varphi \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\varphi}} e^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma_\varphi^2}} d\varphi$$

Вычисляя этот интеграл, получим

$$\bar{u} = NA \ell \frac{\sigma_\varphi^2}{2}.$$

При большом разбросе фазы принятых сигналов следует рекомендовать другой метод, основанный на определении задержки сигнала по его огибающей. С этой при согласованной фильтрации эхо-сигналы подвергаются синхронному детектированию, а после синхронного детектирования суммируются огибающие сигналов.

Как известно, огибающая суммы сигнала с шумом описывается распределением Райса:

$$p(E) = \frac{E}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{E^2 + U_m^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{EU_m}{\sigma^2}\right),$$

где U_m – амплитуда сигнала; σ^2 – дисперсия шума.

Предположим вначале, что уровень структурного шума невелик, его среднеквадратичное значение для каждого из сигналов меньше амплитуды сигнала, по крайней мере, в 3 раза. При этом закон распределения Райса с достаточно хорошей точностью можно аппроксимировать нормальным законом распределения:

$$p(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(E - U_m)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Если полагать, что шумовые составляющие отдельных сигналов в соседних каналах не коррелированы, то при сложении сигналов полезные

составляющие сигналов складываются арифметически, а шумовые добавки к ним – среднеквадратично. При этом отношение сигнал/шум возрастает в \sqrt{N} раз, как и при сложении высокочастотных сигналов, не прошедших этап синхронного детектирования.

Оценим погрешность определения задержки сигналов при использовании синхронного детектирования. Если в качестве зондирующего сигнала используется частотно-модулируемый сигнал с большой базой, который имеет почти прямоугольный спектр в полосе частот от ω_1 до ω_2 , то огибающая сигнала после согласованной фильтрации описывается уравнением

$$U(t) = U_0 \frac{\sin\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right)}{\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t}.$$

Для определения погрешности необходимо сложить N сигналов вида со случайной задержкой и определить статистические характеристики суммарного сигнала. Точное решение этой задачи проблематично из-за сложного вида выражения для огибающей, однако можно получить приближенное решение, подобрав простую аппроксимацию выражения. В качестве такой аппроксимирующей функции может использоваться косинус, что позволяет упростить задачу определения погрешности измерения задержки сигнала. Нетрудно показать, что при $x < 2$ справедлива аппроксимация $\frac{\sin x}{x} \approx \cos(0,56x)$, а при $x > 2$ – $\cos(0,56) < \frac{\sin x}{x}$, и поэтому используемая аппроксимация дает оценку погрешности сверху.

Разработана и прошла апробацию в производственных условиях контроля сетчатых структур из ПКМ методика определения качества конструкции по времени прохождений УЗ-сигнала между элементами сетчатой структуры с использованием ультразвукового тестера УК1401.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ПЕРЬЕВ ПОДОШВЫ РЕЛЬСОВ

Чистякова О.Е.

ЗАО «Фирма ТВЕМА», Москва, Россия

Увеличение скоростей движения поездов, грузонапряженности, а также тенденция к повышению экономической эффективности грузовых перевозок путем увеличения осевой нагрузки делают необходимым повышение эффективности средств дефектоскопии рельсов, которые, в свою очередь

«стоят на страже» обеспечения безопасности движения поездов. Однако, как известно, применяемые в настоящий момент средства сплошного контроля рельсов не обеспечивают контроль всего сечения рельсов. К неконтролируемым зонам относятся перья подошвы.

ЗАО «Фирма ТВЕМА» осуществляет деятельность, которая базируется на наукоемких и инновационных разработках, тем самым внося свой вклад в развитие научно-технического потенциала России. Результатом разработок является высокотехнологичное оборудование специального назначения для диагностики технических объектов, в том числе, объектов железнодорожной инфраструктуры. Понимая всю актуальность вопросов, связанных с обеспечением безопасности движения поездов, учеными компании проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению возможности выявления дефектов подошвы, расположенных не в проекции шейки, при вводе ультразвуковых колебаний с поверхности катания головки рельса.

Проведены теоретические исследования физических процессов распространения ультразвуковых колебаний в рельсе при вводе их с поверхности катания головки. Исследования производились для различных вариантов геометрии, т.е. рельсов различных типов и различных значений бокового и вертикального износа.

С целью оценки распределения акустического поля в перьях подошвы проведены экспериментальные исследования.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы рельсов с искусственными отражателями, расположенными в различных частях перьев подошвы. Общее количество отражателей – 30 шт. Как известно, дефекты подошвы эксплуатационного характера возникают, как правило, в результате коррозионно-усталостных повреждений, развиваются от нижней поверхности подошвы и ориентированы в плоскости, перпендикулярной оси рельса. Следовательно, эти дефекты, в случае развития с кромки подошвы, могут имитироваться пропилом, а в случае развития в любой другой зоне подошвы – сегментом. Расположение сегментных отражателей выбиралось таким образом, чтобы перекрыть все перо, т.е. оси отражателей смещалась относительно оси рельса с шагом не более 5 мм. Такой незначительный шаг был установлен исходя из характера распределения поля и необходимости обеспечения выявления дефекта на самой ранней стадии развития.

С учетом положительных результатов испытаний, полученных в лабораторных условиях, разработчики искренне надеются кардинально исправить плачевную ситуацию, сложившуюся с изломами рельсов по причине развития дефектов в перьях подошвы.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Борминский С.А., Солнцева А.В.

СГАУ, Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам повышения точности акустических методов измерения уровня жидкости в резервуарах. Преимущества акустического метода заключаются в простоте обработки акустических сигналов, а также в отсутствии прямого контакта прибора с жидкостью. Расстояние до жидкости H определяется по формуле:

$$H = \frac{ct}{2}, \quad (1)$$

где c – скорость звука; t – время распространения акустической волны от измерителя уровня до поверхности жидкости и обратно.

Основная сложность возникает при измерении скорости звука c , поскольку она зависит от температуры, плотности, давления, влажности окружающей среды. Максимальное влияние на скорость звука оказывает температура. При изменении температуры воздуха с -30 до $+40$ °С скорость звука изменится на 5,5 %. Чтобы получить достаточную точность (около 0,1 %) для коммерческой эксплуатации необходимо измерять температуру с точностью $\pm 0,5$ °С. Однако температура воздуха у поверхности жидкости и около измерительного прибора не одинакова и пары жидкости могут иметь различный химический состав. Так как учесть их влияние никакими прямыми измерениями невозможно, вычислить скорость звука с требуемой точностью не представляется возможным.

Авторами был запатентован способ измерения суть которого состоит в том, что в волновод добавляются дополнительные реперные отражатели, цель которых – измерение реальной скорости звука по всей длине волновода. Уровень жидкости определяется (рис. 1):

$$H = L_n + \frac{(L_n - L_{n-1})(t(H) - t(O_n))}{t(O_n) - t(O_{n-1})}, \quad (2)$$

где $t(O_i)$ – время распространения от прибора до отражателя O_i и обратно.

Однако практические испытания устройств с дополнительными реперными отражателями показали, что при приближении границы сред к одному из дополнительных отражателей возникает ошибка, причина которой заключается в том, что формула (2) не учитывает ситуаций, когда отражения от границы сред и реперного отражателя, будучи близко расположенных по времени складываются.

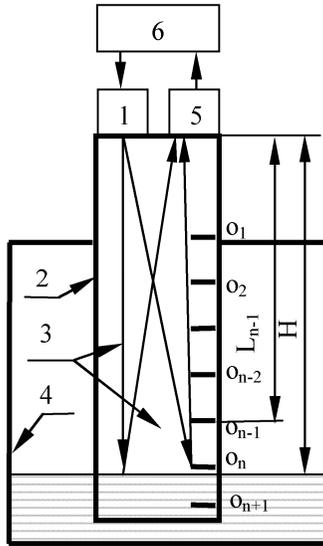


Рис. 1. Волновод с дополнительными отражателями:

1 – излучатель; *2* – волновод; *3* – акустическая волна; *4* – граница сред;
5 – приемник; *6* – устройство обработки сигналов; O_i – *i*-ный реперный отражатель;
 L_i – расстояние от прибора до *i*-го реперного отражателя; *n* – номер крайнего
 перед границей сред отражателя

Предположим, что излучатель *1* излучает *g* периодов гармонического сигнала с длиной волны λ (частотой ω).

Смещение фазы θ может быть вычислено как

$$\theta = 2\pi \frac{H - L_n}{\lambda} = \frac{\omega}{c} (H - L_n). \quad (3)$$

При этом уровень жидкости можно вычислить из уравнения:

$$H = L_{n-1} + \frac{c}{2} \left(t'(H) - t(L_{n-1}) + \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{p \sin \left(\frac{\omega}{c} (H - L_n) \right)}{1 + p \cos \left(\frac{\omega}{c} (H - L_n) \right)} \right). \quad (4)$$

Необходимо отметить, что решение уравнения (4) возможно только в численном виде.

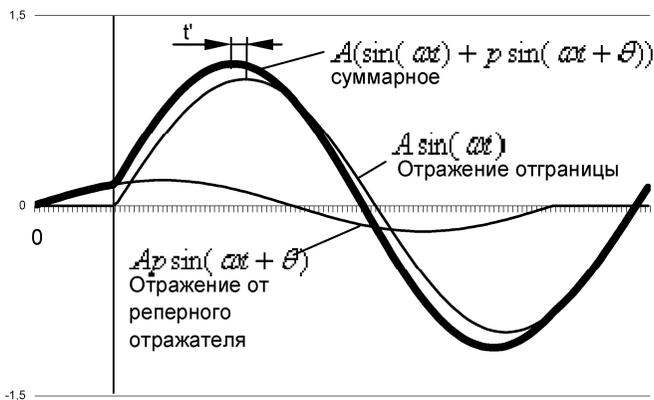


Рис. 2. Сложение отражений от реперного отражателя и границы сред

Проанализировав (4) можно найти максимальную добавляемую погрешность в случае если не учитывать сложение отражений и пользоваться всегда формулой (2).

$$\Delta H = \frac{c}{2\omega} \arctg\left(\frac{p}{\sqrt{1-p^2}}\right) . \quad (5)$$

В частности, при использовании частоты $f = 1\text{кГц}$ и $p = 0,1$ (от реперного отражателя отражается 10 % амплитуды по сравнению с отражением от границы сред) максимальная погрешность при использовании для вычисления уровня (2) составляет 2,6 мм, что полностью соответствует экспериментальным данным.

Из (5) видно, что погрешность обратно пропорциональна частоте. Таким образом, при измерении небольших расстояний, если позволяет затухание, лучше использовать более высокие частоты – это позволит использовать более простую формулу (2) для вычислений. К примеру, на частоте 10 кГц и $p = 0,1$ использование (5) даст погрешность не более 0,26 мм. Однако на практике, в частности при измерении уровня жидкости в скважинах, требуется использование частоты около 100 Гц. В таких случаях для нахождения уровня необходимо использовать (2).

Литература

1. **Скворцов Б.В., Борминский С.А.** Импульсные методы измерений количества и качества жидких углеводородных топлив – Самара, СНЦ РАН, 2010. 226 с.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ РЕЛЬСОВ

Кононов Д.А.

ЗАО «Фирма ТВЕМА», Москва, Россия

По мере увеличения интенсивности движения поездов все меньше времени остается на контроль состояния рельсов и устранение выявленных в них дефектов. Для ускорения выявления дефектов железным дорогам нужны более надежные и производительные технологии дефектоскопии рельсов, в том числе обеспечивающие должное качество контроля при движении вагона-дефектоскопа или дефектоскопной автомотрисы с высокой скоростью.

Высокая интенсивность движения делает необходимым уменьшение продолжительности «окон», что в свою очередь, требует совершенствования оборудования для дефектоскопии рельсов. Дальнейшее совершенствование оборудования, в свою очередь, приводит к необходимости совершенствования средств представления результатов контроля.

Железным дорогам нужна измерительная техника, обладающая высокой производительностью, но не в ущерб качеству дефектоскопии. Вышеперечисленное свидетельствует о необходимости повышения рабочей скорости контроля.

Существенным недостатком действующих в России и других странах известных способов ультразвукового контроля рельсов является невозможность обеспечения высокой скорости контроля при одновременном обеспечении необходимой достоверности. Увеличение скорости контроля может быть достигнуто при увеличении шага сканирования, однако это приводит к недопустимому снижению достоверности контроля (результатов дефектоскопии), поскольку дефекты могут быть пропущены. Для преодоления этого недостатка необходимо находить новые технические решения, позволяющие обеспечить требуемую достоверность результатов дефектоскопии даже при работе на высоких скоростях. В настоящий момент максимальная скорость, при которой возможно проведение ультразвукового контроля составляет 60 км/час, что для участков с большим количеством пар поездов, а также, для участков с высокоскоростным движением, является неприемлемым.

В докладе рассматривается возможность повышения скорости проведения контроля рельсов ультразвуковым методом до 140 км/ч, а также описывается устройство, призванное реализовать эту возможность.

Кроме того, в докладе приводятся результаты опробования новой технологии контроля на скоростных участках железнодорожного пути.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК И C-SAFT ОБРАБОТКИ

Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С.

ООО НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия

В докладе проанализированы возможности применения приборов автоматизированного УЗК, использующих антенные решетки и когерентную обработку данных методом комбинационного SAFT (C-SAFT). Разработан новый алгоритм измерения продольной и поперечной скорости ультразвука, что позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние объекта контроля по сечению и по периметру сварного соединения. Представлены результаты исследований, посвященных улучшению качества изображений дефектов за счет учета профиля внутренней и внешней поверхностей сварного соединения. Разработан алгоритм моделирования и выполнен анализ изображений дефекта, полученных при использовании различных типов волн и путей распространения ультразвуковых волн. Даны примеры изображений реальных дефектов в сварных соединениях. Приведены технические данные и блок-схема прибора, реализующего указанные возможности.

ОПЫТ АУЗК АУСТЕНИТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Вopilкин А.Х., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С.

ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия

Доклад посвящен вопросам замены рентгенографического контроля аустенитных сварных соединений технологических трубопроводов при строительстве комплекса каталитического крекинга на автоматизированный ультразвуковой контроль (АУЗК) и полученным результатам АУЗК аустенитных сварных соединений толщиной до 60 мм. Причиной замены является низкая производительность рентгенографического контроля, трудности в обеспечении необходимой в соответствии с ПБ 03-585-03 чувствительности контроля, организационные трудности, связанные с соблюдением мер безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения. Для проведения АУЗК была предложена методика, основанная на применении голографических методов обработки сигналов и использова-

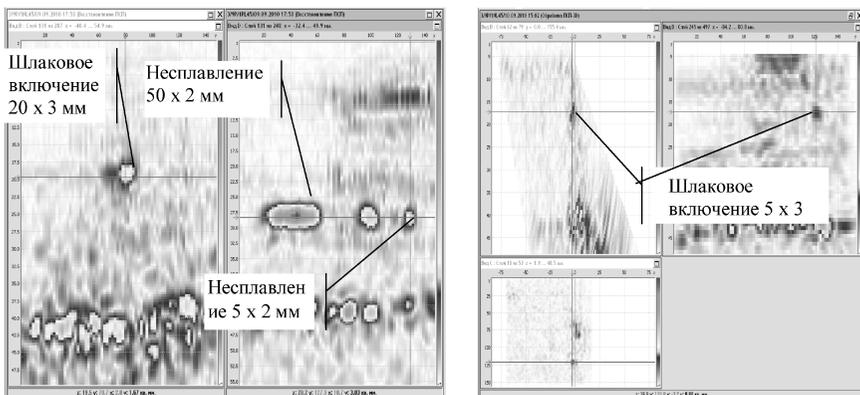
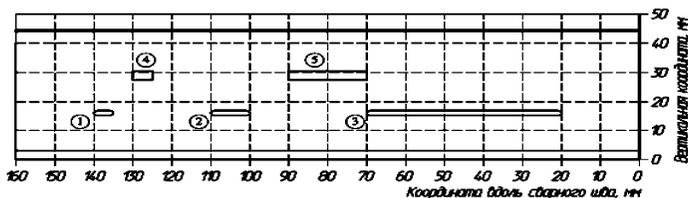


Рис. 1. Результаты АУЗК тест-образца толщиной 52 мм



Данные для ультразвукового контроля.

Условный номер дефекта	Геометрия дефекта	Расположение дефекта
1	Непровар по кромке сварного шва: Длина – 2 мм, высота – 2 мм	Глубина залегания от наружной поверхности – 28 мм
2	Непровар по кромке сварного шва: Длина – 10 мм, высота – 2 мм	Глубина залегания от наружной поверхности – 28 мм
3	Непровар по кромке сварного шва: Длина – 50 мм, высота – 2 мм	Глубина залегания от наружной поверхности – 28 мм
4	Шлаковое включение в сварном шве: Длина – 5 мм, диаметр – 3 мм	Глубина залегания от наружной поверхности – 15 мм
5	Шлаковое включение в сварном шве: Длина – 20 мм, диаметр – 3 мм	Глубина залегания от наружной поверхности – 15 мм

Рис. 2. Параметры дефектов тест-образца (паспортные данные)

нии для контроля двух типов волн: продольной волны сжатия и сдвиговой волны. В ходе испытаний, проводившихся на тест образцах с искусственными дефектами и реальных сварных соединениях и сравнения результатов АУЗК (рис. 1) с паспортными данными тест-образцов (рис. 2) и результатами рентгенографического контроля реальных сварных соединений доказано, что при АУЗК выполняются требования ПБ 03-585-03 по чувствительности контроля и по типам выявляемых дефектов. Так же было показано, система АУЗК АВГУР-Т и получаемые ей результаты контроля удовле-

творяют требованиям ASME CASE 2239-4 по возможности замены рентгенографического контроля ультразвуковым. Было отмечено, что АУЗК, выполняемые по предложенной методике системой АВГУР-Т, обладает более высокими информационными характеристиками, чем рентгенографический контроль. По результатам испытаний предложенная методика получила одобрение в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору России.

В период с 24.09.2010 г. по 13.10.2010 г. на комплекса каталитического крекинга ООО «ЛукойлНижегороднефтеоргсинтез» по предложенной методике было проконтролировано 91 аустенитное сварное соединение из них $\varnothing 558,8 \times 38,1$ – 19 штук; $\varnothing 508,8 \times 34,9$ – 29 штук; $\varnothing 457 \times 34,9$ – 27 штук; $\varnothing 406,6 \times 28,6$ – 16 штук. Результаты контроля были представлены в виде (рис. 3). В процессе АУЗК средняя производительность составляла 6 сварных соединений в день, что было ниже показанной при испытаниях. Одной из причин этому было многообразие конструкций свариваемых деталей, что приводило к значительным временным затратам на перенастройку оборудования. Другая причина это простои при АУЗК в ожидании сварных соединений, вызванные организационными причинами.

Проведенный АУЗК показал большую его производительность по сравнению с рентгенографическим контролем, что позволило выполнить пуск комплекса в срок.

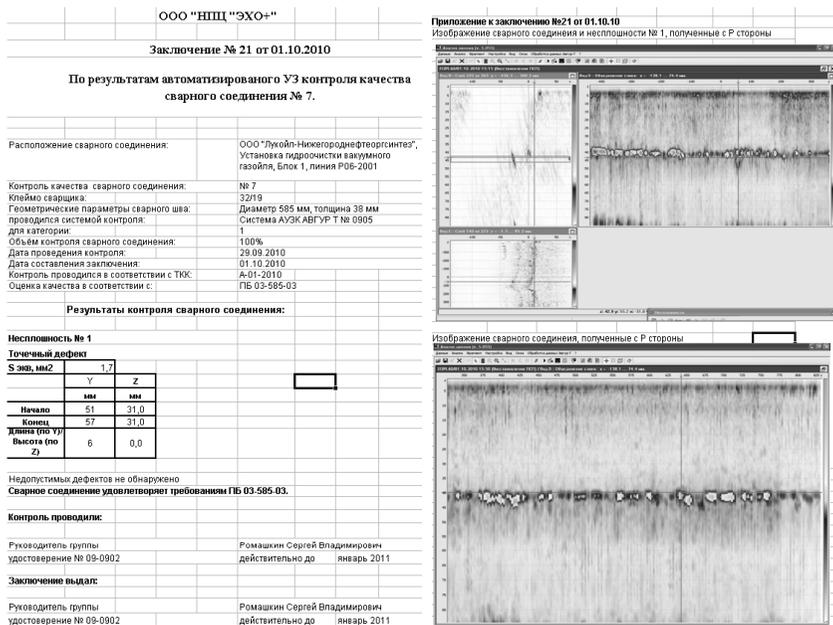


Рис. 3. Пример заключения АУЗК

Выводы

1. Показана возможность замены радиографического контроля аустенитных сварных соединений технологических трубопроводов нефтехимической аппаратуры автоматизированным ультразвуковым контролем с когерентной обработкой.

2. Разработана и успешно прошла испытания инструкция по АУЗК аустенитных сварных соединений. Получено одобрение инструкции от Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России.

3. Рекомендуется при строительстве, ремонте и эксплуатации нефтехимической аппаратуры контроль аустенитных сварных соединений проводить ультразвуковым методом с использованием системы АВГУР-Т

УСЕЧЕННЫЙ ДЕЛЬТА-МЕТОД. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Гурвич А.К., Васильев В.А.
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

В 70-х годах прошлого столетия в СССР (Россия), как и в других странах, уделяется серьезное внимание использованию дифрагированных волн при ультразвуковой дефектоскопии. В работах [1, 2] предложен способ, получивший впоследствии название «Дельта-метод», предусматривающий расположение излучающего (И) и принимающего (П) преобразователей по разные стороны от контролируемой зоны, а, следовательно, и дефекта, подлежащего выявлению. В развитии этого метода предложен усеченный дельта-метод [3] и K_{II} -метод. Усеченный дельта-метод, как правило, предусматривает озвучивание дефектной зоны поперечной волной, излучаемой наклонным ПЭП, и прием прямым ПЭП продольных волн, дифрагированных на выявляемом дефекте (рис. 1).

Таким образом, при контроле изделий с плоскопараллельными поверхностями на приемном ПЭП фиксируется два сигнала дифрагированных волн, сдвинутых во времени на некоторый интервал Δt : первый d_1 – от верхней кромки дефекта, второй d_2 – от нижней кромки дефекта, распространяющийся вниз, отражающийся от дна и поступающий на приемный ПЭП (рис. 1).

В результате теоретико-экспериментальных исследований показана принципиальная возможность при усеченном дельта-методе определять по амплитудно-временным параметрам сигналов, формируемых на компактном дефекте, его:

а) глубину расположения h в изделии толщиной H только по интервалу времени Δt (без связи с углом ввода луча):

$$h = H - 0,5C_1^* \Delta t ;$$

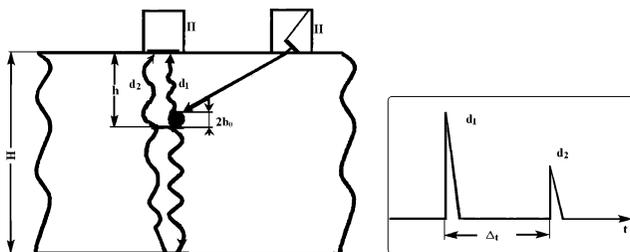


Рис. 1

б) параметр дефекта $2b_0$:

$$2b_0 = C_1^* (2H / C_1 - \Delta t)_t .$$

Если C_1 неизвестна, то она может быть определена по выражению:

$$C_1 = 2H/t_3,$$

где t_3 – интервал времени между зондирующим импульсом и первым донным сигналом.

Сопоставление фактических размеров и глубины расположения моделей дефектов (цилиндрические отверстия) с результатом их определения усеченным дельта-методом приведено в таблице.

Видно, что усеченный дельта-метод может оказаться весьма эффективным при контроле объектов металлопродукции, прежде всего с плоскопараллельными поверхностями.

Естественно, что функциональные возможности предложенных способов оценки размеров и глубины расположения дефектов усеченным дельта-методом в объектах с плоскопараллельными поверхностями требуют дополнительного уточнения при контроле изделий при их производстве.

№	Модель дефекта – цилиндрическое отверстие диаметром $2b_0$, на глубине h_0 (расстояние от верхнего края дефекта до поверхности сканирования), в объекте из стали толщиной H			Результаты измерений Δt , мкс	Расчетное значение глубины расположения модели дефекта h^* , мм	$h_0 - h^*$, мм
	H , мм	$2b_0$, мм	h_0 , мм			
1	59	6	12	16	11,8	0,2
2		6	41	5,5	42,8	1,8
3	78	3	58,5	6,6	58,5	0
4		3	38,5	13,4	38,47	0,03
5		3	28,5	17	27,9	0,6
6		3	8,5	23	9,8	1,3

Литература

1. **Григорьев М.В.** разработка ультразвукового способа распознавания дефектов сварных соединений по амплитудно-временным параметрам дифрагированных волн / Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1985.

2. **Гурвич А.К., Федорова Е.Л.** Дельта-метод оценки конфигурации дефектов, выявленных при звуковом контроле / В сб. «Способы и средства повышения эффективности и надежности ультразвукового контроля сварных металлоконструкций. Л.: ЛДНТП. 1998.

3. **Цомук С.Р.** Разработка способа распознавания видов дефектов сварных соединений по соотношению сигналов поперечной и трансформированной продольной волн / Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Л.: ЛИИЖТ, 1988.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПРОЗВУЧИВАНИИ

Козлов В.Н.

*ООО «Акустические Контрольные Системы»,
Москва, Россия*

В настоящей работе исследуются вопросы, связанные с возбуждением и приемом акустического сигнала при помощи сухого точечного контакта. Изучаются возможности применения такого метода генерации волн для неразрушающего контроля твердотельных образцов, а также в качестве способа измерения скорости продольных волн. Рассмотрены физические аспекты, влияющие на точность метода.

В практике ультразвукового неразрушающего контроля достаточно широкое распространение получил метод определения прочности бетона и других искусственных материалов подобной структуры при поверхностном прозвучивании ультразвуковыми волнами. Принцип действия большинства из этих приборов основан на определении скорости распространения продольной волны путем измерения времени прохождения акустической волной известного базового расстояния между излучателем и приемником [1]. Акустическая волна формируется и принимается с помощью пьезоэлектрических преобразователей. При этом для возбуждения колебаний используется точечный контакт. Такой источник, расположенный на поверхности образца и прижатый к этой поверхности с некоторым заданным усилием возбуждает в исследуемом материале все возможные типы акустических волн: продольные и поперечные объемные волны и поверхностную волну рэлеевского типа. Если считать поверхность образца свободной, то вслед-

ствие необходимости выполнения соответствующих граничных условий на этой поверхности, поверхностный след продольной волны внутри образца генерирует так называемую головную волну. Вследствие этого структура колебаний, принимаемых вторым точечным поверхностным контактным преобразователем на некотором расстоянии от источника, является достаточно сложной и не соответствует чисто продольной волне. Эти факторы влияют в том числе и на точность оценки скорости продольных волн в исследуемом образце. Необходимо отметить, что до сих пор данный вопрос применительно к поверхностным ультразвуковым измерениям подробно в литературе не изучался, что не позволяет достоверно оценить точность таких измерений и влияющие на нее факторы. Одним из этих факторов также является геометрия образца, поскольку измерения зачастую производятся на длинах волн, сравнимых с толщиной исследуемого материала. В этом случае структура возбуждаемых колебаний сильно зависит от преимущественной поляризации источника, и кроме того в образце помимо вышперечисленных могут возбуждаться и иные акустические моды. Знание физических основ формирования сигнала в образце позволяют разрабатывать новые методы контроля материалов и улучшать их точность.

Итак, в настоящей работе подробно рассмотрены вопросы формирования и приема ультразвуковой волны, распространяющейся в объекте контроля, с помощью двух разнесенных преобразователей с сухим точечным контактом, а также влияние силы прижатия преобразователей к поверхности объекта контроля. Показано, что геометрия образца также оказывает существенное влияние на точность и результаты измерений. Таким образом, основным результатом данной работы является получение новых результатов для повышения точности измерений скорости ультразвука при поверхностном прозвучивании, а также выработка рекомендаций для их использования в серийных приборах.

Литература

1. **Чихунов Д.А.** Методика и техника для контроля прочности бетонов и других искусственных каменных материалов // Строительная инженерия. 2005. № 2.
2. **Джонсон К.** Механика контактного взаимодействия // М: Мир. 1989. 510 с.
3. **Manning P.M., Margrave G.F., Stewart R.R.** Dynamic plotting of model surface and body waves // CREWES Research Report. 1999. V. 11.

СЕКЦИЯ № 5. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции: Артемьев Б.В., Горшков В.А.

АППАРАТУРНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ, ДЕЛЯЩИХСЯ И ОСОБО ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ

Горшков В.А., Иванов И.Н., Юмашев В.М.

ОАО «НИИ технической физики и автоматизации», Москва, Россия

Направление атомной науки и техники – радиационная техника, которая представляет собой комплекс ядерно-физических методов и радиационных устройств, является перспективным для многих практических задач обнаружения и идентификации радиоактивных, делящихся и особо опасных веществ.

В данной работе описаны возможности применения аппаратурных ядерно-физических методов обнаружения радиоактивных, ядерных материалов и опасных веществ, применительно к антитеррористической деятельности.

Представлены принципы построения, назначение и области применения аппаратуры для обнаружения ядерных материалов при их закладке в различных средах с использованием гамма – и нейтронных методов неразрушающего контроля. Высокая проникающая способность гамма – и нейтронного излучения позволяет обнаружить ядерные материалы при их закладке в труднодоступных местах и при использовании различных материалов специального назначения.

Представлена портативная рентгенофлуоресцентная аппаратура, позволяющая определить токсичные материалы и провести идентификацию материалов непосредственно на месте взрыва. Анализ осуществляется в широком диапазоне атомных номеров элементов (включая уран) с высокой чувствительностью. Аппаратура обеспечивает экспрессный анализ образцов непосредственно на месте контроля.

Изложены принципы построения аппаратуры для выявления наличия локальных радиоактивных источников, ядерных материалов, устройств подрыва взрывчатки с использованием методов компьютерной томографии и цифровой радиографии. Рассмотрены возможности использованием трансмиссионных и эмиссионных методов компьютерной томографии для

определения ядерных материалов в специальных контейнерах и других закрытых емкостях.

Предлагается использовать новый метод компьютерной томографии на рассеянном излучении для решения специальных задач по обнаружению и идентификации пластиковых закладок в условиях одностороннего доступа к объекту.

Успехи и достижения радиационной техники в России во многом связаны с работами ОАО «НИИ технической физики и автоматизации», где сложилась научная школа, занимающаяся специфическими вопросами технической диагностики и промышленного анализа.

Радиационное приборостроение охватывает методы и аппаратуру, предназначенные для получения информации о параметрах состояния, качества или состава веществ или изделий, функционально связанной с потоком ионизирующего излучения. Эту технику отличают простота, малые габариты и стоимость аппаратуры в сочетании с достаточной чувствительностью.

Современное состояние работ характеризуется следующим: осуществляются качественные изменения в разрабатываемой технике, связанные с широким применением компьютерной техники, использованием более совершенных преобразователей, детекторов излучений, оптимизацией характеристик и мощности облучателей, что позволяет существенно улучшить показатели аппаратуры по точности, чувствительности, производительности, дает возможность использовать получаемые данные для автоматизации контроля. Улучшаются показатели радиационной безопасности используемой техники.

С учетом появления все более совершенных новых технических средств, в процессе создания новой техники актуальным становится методическая составляющая, создание интеллектуальных датчиков, новых алгоритмов. Фактически, современный прибор должен быть информационно-управляющей системой.

РЕНТГЕНОСКОПИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Косарина Е.И.¹, Степанов А.В.¹, Усачев В.Е.²

¹ФГУП «ВИАМ», Москва, Россия

²ООО «Диагностика-М», Москва, Россия

Рентгеноскопический неразрушающий контроль даже при современном развитии электронной техники не имеет широкого распространения в промышленности. Существующие рентгеноскопические установки не универсальны и их адаптация для контроля изделий сложной формы требует

значительных конструктивных изменений, особенно систем перемещения объекта контроля относительно источника излучения и преобразователя. В связи с этим разрабатываемые нашей фирмой рентгеноскопические установки преимущественно модульного типа, имеют разные манипуляторы и разные системы обработки данных. В настоящем докладе представлены примеры решения задач рентгеноскопического неразрушающего контроля качества, проводимого в условиях производства и эксплуатации изделий.

Рентгеноскопическая установка «Норка» успешно используется при эксплуатации авиационной техники для оценки содержания влаги в сотовых конструкциях летательных аппаратов, для оценки качества заделки участков сотовых конструкций в местах соединения их с крепежом при ремонте авиационной техники. Модульный принцип построения установки и возможность применения ее с разными источниками излучения и преобразователями позволил использовать установку для контроля качества сварных соединений во время реконструкции скульптурной композиции «Рабочий и колхозница». Использование несложного поворотного механизма и специального зажимного устройства сделало возможным разработку технологии рентгеноскопического контроля восковых моделей и керамических стержней литых охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД).

Для контроля отливок сложной формы для предприятия «Русское литье» была разработана рентгеноскопическая установка «Леда». Рентгеноскопический контроль отливок из алюминиевых сплавов типа «силумин» посредством «Леды» позволяет проводить разбраковку по пористости, содержащейся в отливках. Согласно действующим отраслевым стандартам для количественной оценки пористости введена балльная система, характеризующая концентрацию и размеры пор в объеме отливки, которые определяют ее прочностные свойства. В состав рентгеноскопической установки «Леда» входит устройство, позволяющее проводить оценку балла пористости в отливке и проводить их разбраковку.

Для ФГУП «ВИАМ» была разработана установка для контроля катодов из сплава на основе кобальта для ионно-плазменного покрытия лопаток турбины ГТД. Характерной особенностью этой установки является получение результатов контроля в виде плоской развертки всей цилиндрической поверхности катода, позволяющей количественно оценить содержание шлаковых включений и усадочных раковин в объеме всего катода.

Помимо перечисленного была разработана установка для контроля каблей.

Для широкого применения рентгеноскопического контроля в производстве и эксплуатации техники необходимы специализированные установки решающие конкретные специфические задачи применительно к каждому изделию.

ЭКСПРЕССНЫЙ КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ КУБИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Потрахов Н.Н., Осес Р.Х., Лифшиц В.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет им. В.И. Ульянова (Ленина),
Санкт-Петербург, Россия*

Доклад посвящен вопросам контроля кристаллографической ориентации монокристаллов жаропрочных сплавов на основе никеля при производстве монокристалльных турбинных лопаток методом направленной кристаллизации.

Экспрессное определение кристаллографической ориентации монокристаллов и величины разориентации субзерен требуется при анализе стержней-заготовок, затравочных пластин, образцов-свидетелей и отдельных участков поверхности отливок [1].

Контроль ориентации образцов небольшого размера выполняют на дифрактометрах общего назначения в характеристическом излучении. Такой контроль участков на поверхности отливок на ДРОНах трудноосуществим, поэтому были предприняты попытки использовать съемку по методу Лауэ. Созданы аппараты с двумерным детектором «Scorpio» (Rolls Royce, Англия) [2, 3] и более современный «Galaxy» (Германия), выдающие и обрабатывающие лауэграммы «в режиме реального времени». Однако они предлагаются по цене, исключающей их широкое применение на моторостроительных предприятиях для контроля каждой отливки при серийном производстве.

Положение изменилось, когда были опробованы двумерные позиционно-чувствительные детекторы на основе экрана с фотостимулируемым люминофором. Благодаря высокой разрешающей способности детектора, его можно расположить близко к точке съемки, и за короткое время экспозиции получить четкую лауэграмму.

Материалы и методы. Разработанная модификация установки ПРДУ – ПРДУ «КРОС» [4] для определения ориентации образцов-монокристаллов по обратным лауэграммам (эпиграммам) включает в себя рентгенозащитную камеру (в которой размещены двухкоординатный столик образца и штатив, несущий блок «излучатель-детектор»), лазерный сканер для считывания дифракционной картины с плоского позиционно-чувствительного детектора, ПК со специализированным программным обеспечением. Острофокусная трубка мощностью 100 Вт позволяет за время 1...2 минуты зарегистрировать эпигramму от участка образца диаметром 0,5...1,0 мм.

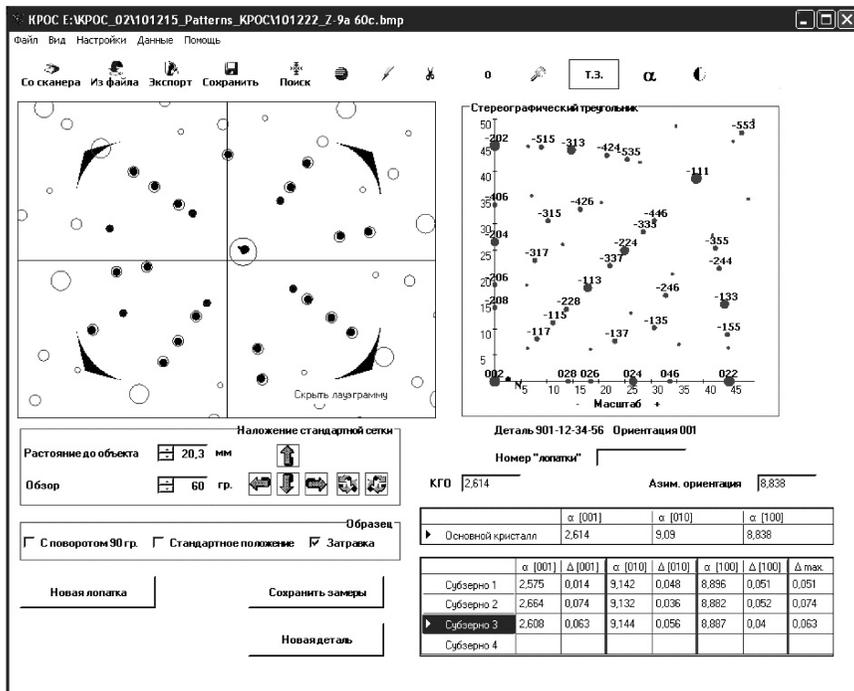


Рис. 1. Рабочее окно программы КГО-Анализ

(в таблице показаны результаты процедуры совмещения лауэ-узоров при повторных запусках программы (тест на воспроизводимость))

Программное обеспечение решает задачу автоматического распознавания лауэ-рефлексов, определения их координат и преобразования эпиграммы в стереографическую проекцию. Начальное совмещение экспериментальной стереограммы с фрагментом стандартной стереограммы ГЦК кристалла производится в диалоге с оператором. «Повороты» стандартной сетки относительно трех координатных осей осуществляются путем пересчета сферических координат всех узлов сетки. Когда лауэ-узоры совпали, это означает, что индексы НКЛ зарегистрированных рефлексов определены. Параметры оптимального совмещения для всей совокупности пар пятен программа находит автоматически. Отслеживаются повороты системы координат [5], связанной со стандартной сеткой, относительно приборной системы координат, и положение кристаллографических осей монокристалла выдается в форме матриц направляющих косинусов.

Результаты и обсуждения. Телесный угол, в котором находятся регистрируемые нормали к отражающим плоскостям, примерно соответствует единичному треугольнику «100-110-111» кубической системы, поэтому оператор в большинстве случаев может сразу распознать характерное расположение рефлексов и быстро подвести соответствующий фрагмент теоретической стереограммы к экспериментальной стереограмме. Но из-за того, что центральная часть стереограммы занята отверстием для коллиматора первичного пучка, и на стереограмме присутствуют части двух (или большего числа) единичных треугольников, нужный фрагмент узора иногда приходится находить методом проб и ошибок.

Для определения разориентировки субзерен требуется, чтобы перемещение образца от одной точки съемки к другой выполнялось строго поступательно, без угловых перемещений. В ПРДУ «КРОС» это обеспечивается использованием координатного столика.

Согласно оценкам, при совмещении 15-20 пар узлов экспериментального лауэ-узора с теоретическим средняя ошибка для пары совмещаемых узлов составляет порядка $0,2^\circ$. Это характеризует точность определения координат рефлексов при обработке эпиграммы. Сама процедура финишного автоматического совмещения узоров совершается с воспроизводимостью около $0,1^\circ$ (рис. 1). Точность измерений ориентации должна быть определена путем параллельных съемок специально подобранных образцов на дифрактометре.

Выводы. Разработана и внедряется на моторостроительных предприятиях РФ (ОАО «ПМЗ», ОАО «Климов», ОАО «Салют») установка ПРДУ «КРОС» для экспрессного анализа ориентации образцов монокристаллов жаропрочных сплавов. В соответствии с действующими СанПиН и ОСПОРБ установка освобождена от контроля и учета органами Роспотребнадзора. Цена установки почти на порядок ниже, чем у импортных аналогов, которые при решении конкретных задач контроля турбинных лопаток дают информацию примерно того же объема.

Список литературы

1. Сидохин Ф.А., Сидохин А.Ф., Сидохин Е.Ф. Об определении кристаллографической ориентации монокристаллов методом Лауэ. «Заводская лаборатория», 2009. Т. 75. № 1. С. 35.
2. Higginbotham G.J.S. From research to cost-effective directional solidification and single-crystal production – an integrated approach. «Mater.Science and Technol.», May 1986, V. 2, p. 442.
3. Jones A.T., Baxter C. The Rolls Royce «Scorpio» system. «Meas.Sci. Technol.» V. 6 (1995) p. 131.

4. Сидохин Е.Ф., Потрахов Н.Н., Сидохин Ф.А. Контроль кристаллографической ориентировки монокристаллов методом Лауэ // VII Национальная конференция «РСНЭ-НБИК 2009».

5. Шереметьев И.А., Белинский С.Н. Стереографическая ЭВМ-система «Pilot-96» для анализа лауэграмм кубических кристаллов. Вестн. Челябин. Ун-та, Сер.6, Физика, 1998. № 1 (2). С. 77.

ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ АРХИВИРОВАНИЯ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ СВАРНЫХ ШВОВ

Мартынов С.А., Самойлов Д.В.

ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР», Москва, Россия

Данный доклад посвящен проблемам, возникающим при архивировании радиографических снимков и опыту внедрения программно-аппаратного комплекса КОРС 2.0 в нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности, системах газораспределения России.

Комплекс КОРС 2.0 предназначен для контроля качества сварных швов с учетом новых требований по радиографическому контролю (ПБ 12-529-03) магистральных и технологических трубопроводов, паровых и водогрейных котлов, сосудов, работающих под давлением, резервуаров для хранения нефтепродуктов, газгольдеров, узлов и деталей нефтеперерабатывающего оборудования.

Аппаратная часть представляет собой персональный компьютер, специализированный сканер для работы с радиографическими снимками и периферийные устройства. Для каждого сканера разработана система тестов, проводимая перед поставкой потребителю, подтверждающая его возможности по обработке рентгеновских изображений. Высокое оптическое разрешение сканера, возможность работы в режиме 16 bit оттенков серого, в сочетании с возможностью обработки радиографических снимков плотностью до 4D, позволяет получать высококачественное изображение на любых российских и зарубежных рентгеновских пленках. Рабочее поле сканера формата А3+ позволяет обрабатывать радиографические снимки размером 30 × 40 см за один проход сканера.

Проявленный радиографический снимок размещается в сканере и оцифровывается. Полученное изображение выводится на мониторе компьютера и обрабатывается с помощью программного пакета, адаптированно к различной промышленности.

Программный пакет комплекса КОРС 2.0 включает в себя:

- программу обработки информации (графический модуль);
- базу данных;
- обучающий альбом.

Графического модуль позволяет оператору проводить подбор оптимальных параметров для расшифровки радиографического снимка, проверку пригодности радиографического снимка к расшифровке по ГОСТ 7512–82 и расшифровку в режиме диалога «оператор-программа». Оценка допустимости дефектов производится с помощью соответствующих «универсальных шаблонов».

Графический модуль включает в себя широкий набор дополнительных функций:

- подбор оптимальных параметров контрастности и яркости вручную или по гистограмме распределения;
- автоматическая калибровка измерения оптической плотности почернения D (функция электронного денситометра);
- электронная лупа 16-кратного увеличения;
- измерение линейных размеров, площадей дефектов, суммирование длин протяженных дефектов;
- маркировка дефектов;
- более 20 цифровых фильтров (позитив, негатив, выделение дефектов и т.д.);
- график распределения значений оптической плотности (линейный профиль) по произвольному сечению;
- гистограмма распределения оптической плотности всего снимка;
- трехмерное представление распределения оптической плотности по площади контролируемого участка радиографического снимка;
- алгоритм двойного сохранения информации во избежание случайной потери данных;
- сохранение последовательности действий при работе оператора с целью контроля за процессом расшифровки.

Проблемой в основном являются протоколы контроля. В нашем случае результаты расшифровки радиографического снимка из графического модуля передаются в базу данных, автоматически формируя протоколы. База данных программируется с учетом нормативных документов регламентирующих радиографический контроль (ГОСТ 7512–82, ВСН-012, СТО и т.д.). Она также содержит информацию о контролируемых объектах, подрядных организациях, специалистах и сварщиках, сроков действия их удостоверений и статистические отчеты (по объемам проведенного контроля, браку, работе каждого специалиста). В базе данных организован многокомпонентный поиск. Защита информации от несанкционированного доступа, корректировки и копирования организована с помощью технологии HASP.

Для повышения квалификации специалистов разработан обучающий альбом радиографических снимков с типичными дефектами сварки.

Одной из последних разработок является новая версия автоматической калибровки оптической плотности с целью повышения точности измерений и перехода от точечной калибровки оптической плотности к калибровке по всей плоскости калибровочного образца.

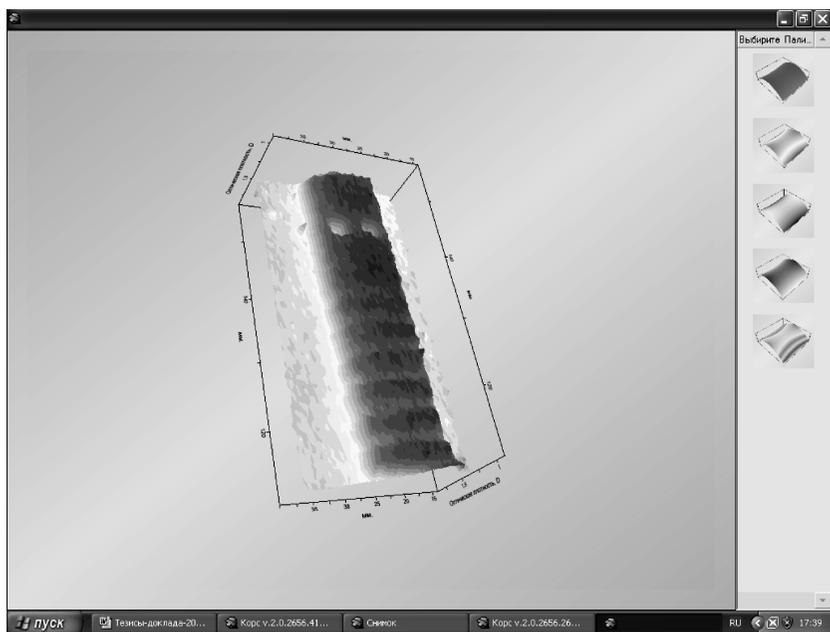


Рис. 1. Трехмерное представление распределения оптической плотности канавочного эталона

Комплекс КОРС 2.0 имеет Сертификат соответствия № 113 и Свидетельство об аттестации № 03 3 027 в Системе неразрушающего контроля Ростехнадзора. Успешно проведены испытания с целью подтверждения метрологических характеристик комплекса.

Комплекс внедрен более чем в семидесяти производственных объектах России, Казахстана и Туркмении. Эксплуатирующими организациями была отмечена высокая надежность комплекса, быстрая отбраковка снимков, не подлежащих расшифровки по ГОСТ 7512–82, облегчение ведения учета и статистики, позволяющее существенно увеличить производительность труда. Анализ внедрения комплекса показал возможность мониторинга соблюдения технологии сварки и проверки квалификации сварщиков.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СИГНАЛИЗАТОР ОПАСНОГО УРОВНЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СУР-02и

Мартынов С.А.¹, Игнатов С.М.²

¹ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР», Москва, Россия,

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Данная статья посвящена разработке оборудования, связанного с особенностями эксплуатации импульсных рентгеновских приборов и установок, а также непосредственной защиты персонала при появлении опасных уровней радиации.

Сцинтилляционный сигнализатор рентгеновский пороговый СУР-02и предназначен для контроля превышения индивидуальной рентгеновской нагрузки на персонал при работах с использованием импульсных приборов, например БИГ-300 и БИГ-500.



При превышении установленной мощности дозы импульсного рентгеновского излучения прибор генерирует световой и звуковой сигналы.

В качестве детектора рентгеновского излучения в сигнализаторе СУР-02и используется детектор гамма излучения, основанный на сочетании сцинтиллятора ScI(Tl) и фотоумножителя типа СРТА 149b-26.

Все основные параметры прибора СУР-02и, а также параметры внешних условий и параметры внутренних элементов, учитываются контроллером, снабженным соответствующим алгоритмом.

Технические данные:

Порог срабатывания, мЗв/час	0,03
Диапазон рабочих температур, °С	-30...+ 40
Время непрерывной работы, ч	50
Питание, литиевая батарея, В	3,5
Габаритные размеры, мм	120×38×22
Масса, г	100

УЧАСТИЕ УЗБЕКИСТАНА В МЕЖДУНАРОДНОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ПРОЕКТЕ МАГАТЭ «ОПТИМИЗАЦИЯ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РАДИОГРАФИИ»

Азизова А.К.

Центральная лаборатория НК, НГМК, Навои, Узбекистан

Цифровая радиография занимает все более уверенные позиции в ряду современных методов неразрушающего контроля. Преимущества ее очевидны: это цифровые возможности анализа радиограмм, удобство их хранения и пересылки, отсутствие затрат на расходные материалы, большая продуктивность, меньший риск для оператора и многое другое. Однако, в настоящее время организация на производстве цифровой промышленной радиографии все еще требует немалых финансовых вложений, в основном из-за стоимости соответствующего оборудования, чего многие, к сожалению, не могут себе позволить.

Организуя описываемый исследовательский проект, Международное агентство по атомной энергии, МАГАТЭ, имело целью попытаться удешевить технологию и этим дать возможность предприятиям из стран-участниц, в особенности развивающихся, получить в распоряжение собственный прибор для проведения цифровой радиографии и обучения ей своих специалистов неразрушающего контроля. Для реализации этого, каждая из организаций, принимающих участие в проекте, должна была собрать свой флюороскоп, используя оптические и электронные составляющие, закупленные и присланные МАГАТЭ, а корпус прибора изготовить самостоятельно, действуя по чертежам немецкого института материаловедения ВАМ.

В проекте были задействованы команды из 11 стран: Аргентина, Бразилия, Германия, Индия, Канада, Малайзия, Пакистан, Румыния, Сирия, Уругвай и Узбекистан. Среди них специалисты НК как уже работающие в сфере компьютерной радиографии и томографии, оцифровки пленочных радиограмм, съемки на гибких пластинах и других областях современной цифровой радиографии, так и новички, столкнувшиеся с темой впервые, и получившие, таким образом, уникальную возможность обмена опытом. К последним можно было отнести и нас, команду из Узбекистана, – потому, участие в исследовании было для нас особенно полезным, за что мы безмерно благодарны МАГАТЭ.

Узбекистан в проекте представляла Центральная лаборатория НК Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК). Корпус опытного флюороскопа, состоящий из стальных креплений под видео-камеру и оптику, свинцового экрана для защиты камеры от излучения и стальной внешней конструкции, был полностью изготовлен Навоийским машиностроительным заводом, подразделением НГМК.



Рис. 1. Представители стран-участниц проекта на встрече в штаб-квартире МАГАТЭ в Вене

Принцип действия прибора следующий: рентгеновское излучение стандартной рентгеновской трубки, пройдя контролируемый объект, попадает на флуоресцентный экран на входе флюороскопа и преобразуется в видимое излучение, несущее информацию об объекте; затем, уже внутри корпуса, поток видимого излучения поворачивается на 90 градусов зеркалом, проходит освинцованное стекло, защищающее камеру от остаточных рентгеновских лучей, и попадает в объектив; объектив фокусирует изображение на ПЗС-матрице видео камеры, которая, в свою очередь, преобразует аналоговый сигнал в цифровой для вывода на мониторе компьютера.



Рис. 2. Экспериментальная установка для цифровой радиологии, собранная в НГМК, Узбекистан

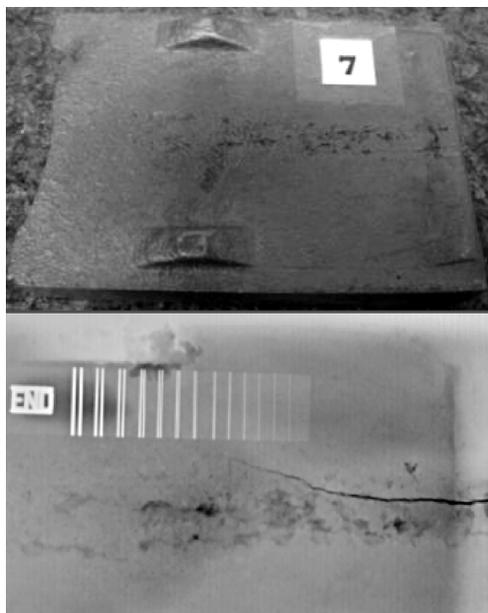


Рис. 3. Один из опытных образцов (отливка) и его флюорограмма, полученная на собранном в Узбекистане приборе

Пользователь, таким образом, получает «online» рентгеновское изображение, для работы с которым используется специальное программное обеспечение, специально разработанное тем же институтом материаловедения ВАМ. Параметры видеосигнала можно изменять с помощью программы и «аккумулировать» в статические радиограммы, выставляя необходимое время экспозиции.

Для сравнения качества собранных в разных странах опытных приборов каждая исследовательская команда сделала свою серию снимков реальных объектов с дефектами. Все флюорограммы собраны в единую базу, и будут изданы МАГАТЭ в специальном каталоге. Кроме того, участниками разработан и готовится к печати технический документ, содержащий методические рекомендации по изготовлению, настройке и использованию таких флюороскопов.

Итоговая себестоимость собранного в НГМК флюороскопа составила приблизительно 4200 долларов США, из которых около 3800 заплачено за оптико-электронную «начинку» и 400 – за изготовление корпуса.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

Артемьев Б.В.¹, Буклей А.А.¹, Созонтов А.Н.²

¹ЗАО «НИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

²КЗОЦМ, Киров, Россия

Принципиально новый алгоритм дистанционного обслуживания оборудования невозможно внедрить без преодоления психологических барьеров руководства предприятия. На сегодняшний день получение внешнего фиксированного IP_адреса для сервера обслуживающего приборы в сети по месту эксплуатации, что позволяет организовать обращение к каждому прибору, минуя посредников в лице персонала завода, не составляет проблемы. Совершенно иная ситуация была еще несколько лет назад. За десять лет работы приборов «Спектр_групп» в прокатном производстве в данном режиме накоплен определенный опыт дистанционного обслуживания и диагностики. Примером тому может служить 10 летний опыт эксплуатации толщиномеров серии РИТ10, работающих на станках завода КЗОЦМ (г. Киров). На рис. 1 показана архитектура системы дистанционного обслуживания.

В докладе приведены получаемые дистанционно, без участия персонала завода (сотрудников цеха) результаты тестирования толщиномеров, проводимого после профилактики станов. Априорно известные значения рабочих характеристик и предельные допуски на дисперсию измеренного сигнала, получаемого в процессе калибровки по встроенным образцам, а в случае спорных ситуаций по комплекту эталонных образцов, позволяют в 99 % случаев отказа или сбоя однозначно диагностировать ситуацию и давать точные указания персоналу завода для устранения неисправностей до начала их влияния на качество выпускаемой продукции.

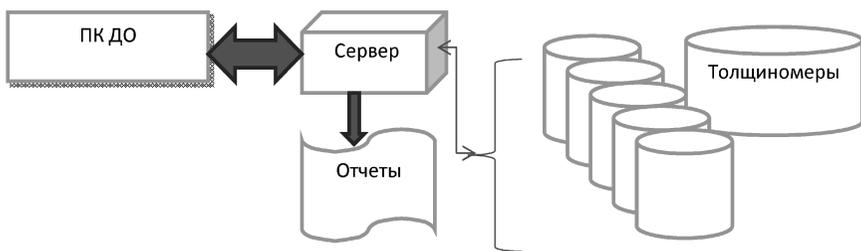


Рис. 1

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПБ 03-585 03 ПРИ РАДИОГРАФИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Гнедин М.М.¹, Галкин Д.И.²

¹*Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики (Технический университет),
Москва, Россия*

²*ИНУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Э.Н. Баумана,
Москва, Россия*

В докладе рассматриваются вопросы обеспечения требований ПБ 03-585 03 при радиографическом контроле технологических трубопроводов. Приведены наиболее распространенные схемы просвечивания и дан график для определения минимального количества экспозиций по схеме черт. 5г ГОСТ 7512–82. Подробно, в т.ч. и на примере, рассматриваются вопросы проведения балльной оценки качества сварных соединений технологических трубопроводов,

Уточнены параметры требуемой чувствительности контроля.

В дискуссионном плане рассматриваются вопросы определения глубины непровара в сварных соединениях технологических трубопроводов.

СЕКЦИЯ № 6. ПОДГОТОВКА ПЕРСОНАЛА, МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Руководители секции: Барвинок В.А., Муравьев В.В.,
Муравская Н.П., Волкова Е.Н.

СИСТЕМА ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ ПО ВИЗУАЛЬНОМУ И РАДИОГРАФИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ

Гнедин М.М.¹, Галкин Д.И.²

¹*Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет), Москва, Россия*
²*ИНУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Э.Н. Баумана, Москва, Россия*

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, определяющим соответствие продукции требованиям контракта (договора).

В докладе рассматривается система Европейских стандартов (EN) по визуальному (VT) и радиографическому контролю (RT), которые широко применяются в промышленности.

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

– при подготовке и сертификации персонала визуального и 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, относящихся к следующим секторам продукции согласно EN 473:

- отливки (*c*);
- сварные изделия (*w*);
- трубы и трубопроводы (*t*);
- прокат (w_p) (только для визуального контроля);
- поковки (*f*) (только для визуального контроля) и составлены блок-схемы взаимосвязи требований КД по этим направлениям.

Подготовлено справочно-информационное пособие «Визуальный и радиографический контроль в системе стандартов EN».

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Гуляева О.Г., Долгих А.В.
*ООО «Институт промышленной безопасности»,
Самара, Россия*

Одной из всемирно признанных систем оценки соответствия является система, изложенная в стандартах ИСО серии 17000. В основе системы оценки соответствия лежат требования международного стандарта серии ИСО 17 000: 2004 «Нормы и правила по проведению оценки соответствия». Он определяет оценку соответствия как доказательство того, что заданные требования к продукции (услуге), процессу, системе, персоналу или органу выполнены.

Процедуры оценки соответствия (ГОСТ Р ИСО 17000):

- Контроль и испытания;
- Декларирование;
- Инспекция и экспертиза;
- Аттестация и сертификация;
- За исключением оценки соответствия в форме государственного контроля и надзора.



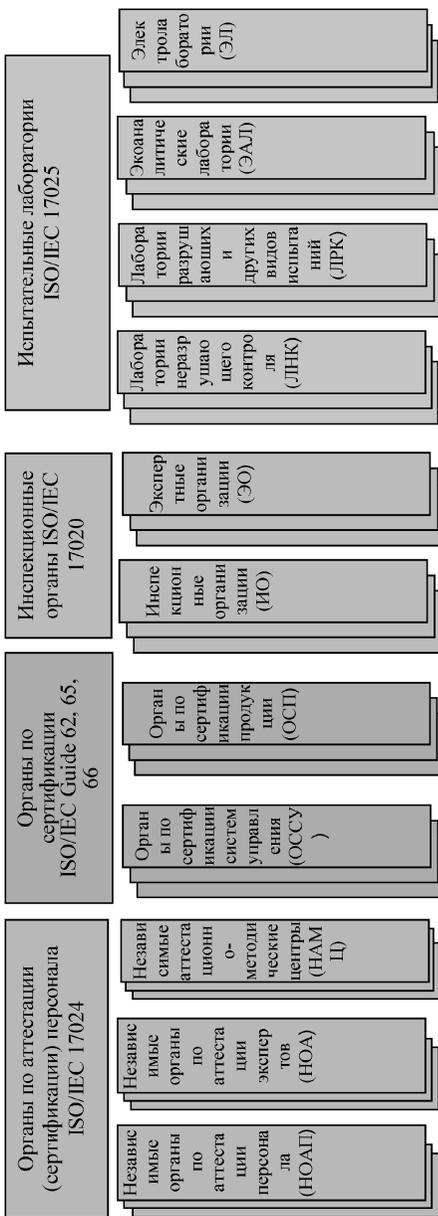
Наблюдательный совет			
Ростехнадзор ¹	РАН ²	РСПП ³	ТПП ⁴

Центральный орган (Координирующий орган, Орган аккредитации)⁴		
Технические комиссии	Комиссия по правилам	Комиссия по аккредитации

Территориальные
уполномоченные органы

Комиссия по апелляциям

Органы оценки соответствия



Основные цели системы оценки:

- единый системный подход к оценке на всех этапах – от аттестации персонала, испытаний, инспекций организаций, до сертификации систем менеджмента качества;
- формирование общих принципов оценки соответствия;
- стандартизация правил, норм и перечней;
- повышение уровня промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве.

На базе стандарта серии ИСО 17 000: 2004 «Нормы и правила по проведению оценки соответствия» разработана, внедрена и эффективно функционирует Единая система оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве (ЕС ОС).

Преимущества Единой системы:

- комплексный подход к проведению оценки соответствия;
- обеспечение оценки соответствия по унифицированным критериям и процедурам;
- прозрачность требований;
- использование апробированных и международно-признанных процедур;
- гармонизация нормативной базы с международными стандартами

Официальное признание ЕС ОС.

ЕС ОС система, зарегистрирована в Ростехрегулировании (№ РОСС RU.3327.04БШ00 от 19.06.2006 г.), и соответствует требованиям Европейского сотрудничества по аккредитации (European co-operation for Accreditation (EA)).

Европейское сотрудничество по аккредитации

В период с 25 по 26 ноября 2009 года в г. Брюгге (Бельгия) на 24-й Генеральной Ассамблее Европейского сотрудничества по аккредитации (далее EA) состоялось подписание двустороннего соглашения с ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность».

Впервые российский орган по аккредитации подписал двустороннее соглашение с EA – одной из самых уважаемых и известных организаций, объединяющих органы по аккредитации в мире, наряду с Международным Форумом по аккредитации (IAF) и Международным сотрудничеством по аккредитации лабораторий (ILAC).

Двустороннее соглашение распространяется:

- взаимное признание деятельности по аккредитации;
- взаимное признание деятельности аккредитованных органов по сертификации персонала (выдаваемых ими сертификатов, удостоверений и т.д.).

В феврале 2010 года заключено Соглашение о взаимодействии между Ростехнадзором и Центральным органом ЕС ОС, ОАО НТЦ «Промышленная безопасность».

Подтверждение компетентности органов по оценке соответствия является действенным инструментом повышения качества их работ так как, с одной стороны, позволяет организациям подтвердить свою компетентность и, с другой стороны, уменьшает риск заказчика выбрать некомпетентного исполнителя услуг по оценке соответствия.

В тоже время оценка соответствия продукции или иных объектов, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров является основой конкурентоспособности организации.

Сертификаты и свидетельства об оценке соответствия – это официальные документы, которые помогут организации снизить страховые платежи, получить преимущество при участии в тендерах и заключении договоров. Подготовка к процессу оценки соответствия структурирует внутренний документооборот и повышает качество работ.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ И АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Пилин Б.П., Ролдугина З.И.

ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», Волгоград, Россия

Доклад посвящен вопросам подготовки и аттестации в России специалистов неразрушающего контроля I и II уровня квалификаций.

В докладе рассматривается действующая в стране система подготовки и аттестации специалистов по различным методам неразрушающего контроля (НК); анализируется отведенное по правилам время на обучение и аттестацию по отдельным методам НК; требования к форме обучения и аттестации, к изучаемым средствам НК, учебным и испытательным образцам объектов контроля, изучению методик контроля и технологии проведения контроля; рассматриваются проблемы освоения современных средств и технологий контроля, порядок и форма проведения экзаменов и аттестации кандидатов на I и II уровни квалификации по отдельным методам, их достоинства и недостатки, в частности, порочность тестовой системы аттестации по типу ЕГЭ; отмечается специфика неразрушающего контроля в различных отраслях промышленности.

Докладчики делятся опытом подготовки и аттестации специалистов НК, накопленным в институте «ВНИКТИнефтехимоборудование» с 1972 г., т.е. с момента создания отраслевого сектора НК в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и подготовки для отрасли специалистов НК.

В докладе отмечается острая необходимость подготовки специалистов НК в отраслевых средних специальных и технических учебных учреждениях (техникумах и ПТУ) для обеспечения предприятий различных отраслей страны высококлассными специалистами НК.

Страховые платежи, получить преимущество при участии в тендерах и заключении договоров. Подготовка к процессу оценки соответствия структурирует внутренний документооборот и повышает качество работ.

ПЕРЕХОД К ИЗМЕРЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЯХ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

Венгринович В.Л.¹, Цукерман В.Л.¹, Дмитриевич Д.В.¹,
Остривной А.Ф.², Иванов С.Ю.², Лобашев А.А.²

¹*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, С.-Петербург, Россия*

В настоящей работе рассмотрены вопросы метрологического обеспечения измерения напряжений, описан разработанный во ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева макет эталона механических напряжений, с помощью которого во ВНИИМ были проведены сравнительные испытания различных методов НК напряжений. В статье приведены результаты измерения, полученные с помощью метода эффекта Баркгаузена и прибора «Introscan», разработанного в ООО «НПФ Диагностика» и Институте прикладной физики НАН Беларуси. Результаты, полученные другими методами и приборами, не приведены из-за большой неопределенности измерений с их использованием. Мотивация доклада состоит в том, что при оценке внутренних напряжений методами неразрушающего контроля (НК) такие влияющие факторы, как отклонения химического состава и микроструктуры контролируемого материала, остаточная пластическая деформация, взаимовлияние главных компонент двухосного напряженного состояния, состояние поверхности и др. маскируют зависимость физических параметров от собственно напряжений и вносят неопределенность в результаты измерений.

В докладе описан работающий макет, на котором показаны как принципиальная возможность создания эталона, так и приблизительная точность воспроизведения величины механических напряжений. Макет эталона напряжений разработан во ВНИИМ, результаты его тестирования и испытания с его помощью неопределенности измерения напряжений методом эффекта Баркгаузена на тестовых образцах из двух марок сталей: ст. 20 и 44НХЮТ приведены в докладе. Показано, что при оценке напряжений для снижения неопределенности и повышения точности измерений необходимо учитывать анизотропию двухосного напряженного состояния. Технология измерения напряжений с учетом анизотропии разработана в Институте прикладной физики НАН Беларуси.

Эталон механических напряжений осуществляет воспроизведение заданного поля напряжений $\sigma_{ik}(\mathbf{x})$ в цилиндрическом упругом теле с требуемой точностью. Передача любым приборам НК размера физической величины механического напряжения – необходимое требование к эталону. В докладе подчеркивается необходимость также создания и вторичных образцов для передачи размера единицы напряжения приборам НК, ориентированным на применение в различных отраслях промышленности, например, в трубопроводах или других объектах.

Для воспроизведения единицы механического напряжения в эталонной установке осуществляется передача размера единицы величины силы непосредственно от Государственного первичного эталона силы (ГПЭ) силы и ГПЭ длины, находящихся во ВНИИМ. При этом во вторичном образце возникает неоднородное поле напряжений $\sigma_{ik}(\mathbf{x})$ с разными отличными от нуля компонентами и нетривиальной зависимостью от координаты \mathbf{x} . Это поле и является воспроизводимым полем механических напряжений на вторичном эталонном образце. И именно по нему калибруются и поверяются приборы НК напряжений.

В разработанной конструкции эталона осуществляется внецентренное нагружение упругого цилиндрического тела. При этом возникает неоднородное поле напряжений $\sigma_{ik}(\mathbf{x})$, которое приводит к сжатию цилиндра с одной стороны и растяжению с другой с непрерывным распределением напряжений во всем требуемом диапазоне. На поверхности цилиндра возникает – от максимального сжатия до максимального растяжения, величины которых определяются нагрузкой F .

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОНСТРУКЦИЙ И ОБЪЕКТОВ

Крайний В.И., Троицкий-Марков Т.Е.

*ООО «Технологический институт энергетических обследований,
диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», Москва, Россия*

В докладе рассматривается системный подход к исследованию технического состояния конструкций и объектов с помощью методов неразрушающего контроля с целью повышения качества и надежности обнаружения дефектов и повреждений.

Основными тенденциями обследования объектов с целью определения дефектов и повреждений являются повышение точности определения дефектов и их характеристик.

Предлагается квазиоптимальная процедура обследования конструкций (объектов), заключающаяся в следующем.

Проводят детальное инструментальное обследование элементов конструкции (объекта), определяют фактические параметры и характеристики материалов элементов. Устанавливают критерии пригодности и их допустимые величины.

Определяют фактические параметры состояния и характеристики конструкции на глубину не менее требуемой, операции измерения характеристик осуществляют с пространственным шагом (шагом – Δa) по поверхности, определяемым необходимой достоверностью получаемых результатов (из условий минимизации вероятности пропуска аномалий Δx_{dmin} , Δy_{dmin}):

$$\Delta a \leq \begin{cases} (0,2\dots 0,3)x\Delta x_{dmin} & \text{если } \Delta x_{dmin} \leq \Delta y_{dmin} \\ (0,2\dots 0,3)x\Delta y_{dmin} & \text{если } \Delta y_{dmin} \leq \Delta x_{dmin} . \end{cases}$$

Определяют фактические значения параметров повреждений, дефектов и связей отдельных составляющих конструктивных элементов конструкции, осуществляют классификацию выявленных дефектов, повреждений и отклонений от нормативной документации по заданным критериям.

Размеры минимального дефекта (аномалии) контролируемой конструкции (Δx_{dmin} , Δy_{dmin} , Δz_{dmin}), оказывающего влияние на качество и надежность конструкции, определяют, решая систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^{\Delta X_{\min}} p(\Delta X_i) d(\Delta X) = 1 - \delta; \\ \int_0^{\Delta Y_{\min}} p(\Delta Y_i) d(\Delta Y) = 1 - \delta; \\ \int_0^{\Delta Z_{\min}} p(\Delta Z_i) d(\Delta Z) = 1 - \delta, \end{array} \right.$$

где δ – вероятность того, что $(\Delta x_{дi}, \Delta y_{дi}, \Delta z_{дi}) \geq (\Delta x_{д\min}, \Delta y_{д\min}, \Delta z_{д\min})$; $p(\Delta X_i)$, $p(\Delta Y_i)$, $p(\Delta Z_i)$ – функции распределения величин дефектов $\Delta x_{дi}$, $\Delta y_{дi}$, $\Delta z_{дi}$.

Осуществляют построение многопараметровой пространственной (3-х мерной) дефектной ведомости с оценкой степени влияния текущего состояния элементов, дефектов и повреждений на эксплуатационную надежность и качество конструкции.

После этого расчетным путем на основе обработки данных многопараметровой пространственной дефектной ведомости определяют конкретные значения критериев пригодности элементов конструкции и объекта в целом и сравнивают их с допустимыми величинами.

Осуществляют повторение операций многопараметрового контроля M раз через промежутки времени τ , определяемые статистическими моделями изменения свойств конструкции, и оценивают динамику изменения эксплуатационной надежности и качества элементов и конструкции в целом (износа, старения, разрушения). В случае, когда значения параметров контролируются через интервал времени τ , появляется опасность пропустить (не обнаружить) дефект.

Оптимальный интервал последовательного измерения (τ) определяют путем решения уравнения [1]:

$$P = \frac{1}{\tau} \int_{T_0 - \frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} d\eta \int_{\eta - \frac{\tau}{2}}^{\eta + \frac{\tau}{2}} f(T) dT,$$

где τ – временной интервал измерения; $\eta = \tau' + T$; τ' – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $[-\tau/2, \tau/2]$; $f(T)$ – плотности распределения длительности T дефекта во времени; P – вероятность того, что дефект не будет обнаружен; T_0 – временная разрешающая способность измерительных датчиков.

Количество повторений операций M многопараметрового контроля определяют из условий получения значимых результатов с заданной погрешностью (δ), например,

$$M \geq \left(\frac{\sigma_0(V)}{\delta V} \right)^2,$$

где $\sigma_0(V)$ – среднеквадратичное отклонение (погрешность измерения) параметра V при однократном измерении; δV – заданная погрешность измерения параметра V .

После этого расчетным путем на основе обработки данных M многопараметровых пространственных дефектных ведомостей, полученных через промежутки времени τ , определяют конкретные значения критериев пригодности элементов конструкции и объекта в целом и сравнивают их с допустимыми величинами.

На основании полученных результатов определяют область $LM(x, y, z)$ конструкции, в которой имеются аномалии (дефекты) контролируемых параметров (отклонения от нормативной документации, дефекты, повреждения, аномалии характеристик и т.п.) по результатам повторения M операций контроля:

$$LM(x, y, z) \subseteq \begin{cases} \Delta V_1 > \Delta V_{1\min} \\ \Delta V_2 > \Delta V_{2\min} \\ \Delta V_i > \Delta V_{i\min} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta V_N > \Delta V_{N\min}, \end{cases}$$

где $LM(x, y, z)$ – область в пространстве (x, y, z) ; ΔV_i – размер аномалии (дефекта) i параметра контроля качества; $\Delta V_{i\min}$ – минимальный размер аномалии (дефекта) i параметра контроля качества, оказывающей влияние на безопасность и надежность конструкции; i – номер параметра контроля качества; N – количество параметров контроля качества.

На основании анализа формы области $LM(x, y, z)$ конструкции, в которой имеются аномалии (дефекты) контролируемых параметров, с учетом степени влияния i параметра контроля качества $i = 1, 2, \dots, N$ на качество и надежность конструкции осуществляют классификацию состояния сооружения в целом:

$$LM(x, y, z) \subseteq \begin{cases} Q1, \\ Q2, \\ Q3, \end{cases}$$

где классы $Q1$ – нормальное; $Q2$ – удовлетворительное; $Q3$ – неудовлетворительное; $Q4$ – предаварийное.

На основании этого сравнения устанавливают пригодность элементов конструкции и объекта в целом для дальнейшей безопасной эксплуатации, необходимые виды ремонта, возможные дальнейшие повреждения.

При установлении критериев пригодности элементов конструкции и объекта в целом для дальнейшей безопасной эксплуатации, их допустимых величин и установления пригодности могут использоваться методы теории распознавания образов.

Список литературы

1. Будагин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М.: Наука, 2002. 472 с.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КОНТАКТНОГО КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ

Кагиров А.Г.

*Томский политехнический университет,
Томск, Россия*

Доклад посвящен вопросам повышения точности определения проводимости растворов электролитов при контактной кондуктометрии. В докладе рассматривается принцип повышения точности измерительных схем кондуктометров, при котором погрешность измерения может быть одинаковой во всем диапазоне измеряемой проводимости. Это достигается нормированием выходного напряжения на кондуктометрической ячейке, которое не зависит от проводимости раствора. Данное схемотехническое решение не приводит к увеличению стоимости конечного прибора и может быть рекомендовано при реализации кондуктометров промышленного и учебно-лабораторного назначения.

Нами предлагается схема измерения, при которой обеспечивается нормированное выходное напряжение на электрохимической ячейке, а также заданная точность измерения проводимости как при измерении проводимости концентрированных, так и разбавленных растворов. Отличие от традиционных методов заключается в использовании источника переменного напряжения с регулируемой амплитудой, а также образцовых резисторов, коммутируемых в резистивном делителе. На рис. 1 изображена схема, поясняющая принцип работы измерительного тракта кондуктометра.

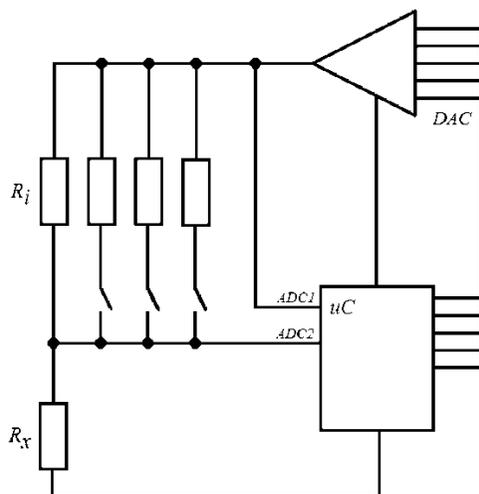


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема кондуктометра

Напряжение с генератора подается на резистивный делитель, образованный известным сопротивлением и кондуктометрической ячейкой. Первый аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) измеряет переменное напряжение непосредственно на кондуктометрической ячейке, второй АЦП измеряет напряжение источника. При таком подключении связь между напряжением источника и напряжением на кондуктометрической ячейке выражается формулой

$$V_x = \frac{V_0}{R_x + R_i} R_x, \quad R_x = \frac{R_i}{\frac{V_0}{V_x} - 1}, \quad (1)$$

где V_x – напряжение на кондуктометрической ячейке, R_i – образцовое сопротивление, V_0 – напряжение источника, R_x – измеряемое сопротивление раствора.

Для того, чтобы ячейка работала при определенном фиксированном напряжении (пусть $V_x = 100$ мВ) АЦП непрерывно измеряет текущее ее значение и передает сигнал в центральный процессор. Постоянство напряжения на кондуктометрической ячейке обеспечивается следующим: при условии $V_x > 100$ мВ процессор передает сигнал об уменьшении амплитуды источника напряжения, при $V_x < 100$ мВ – об увеличении, до тех пор пока не выполнится условие $V_x = 100$ мВ. Далее второй АЦП измеряет напряжение источника, а сигнальный процессор пересчитывает сопротивление раствора по образцовому сопротивлению и значению двух АЦП по формуле (1).

1. Диапазон измерения проводимости растворов

L	R_x	R_i	V_0	I
0,03...1 См	1...30 Ом	47 Ом	0.25...5 В	100 мА
1...30 мСм	30...1000 Ом	1,5 кОм		3 мА
0,03...1 мСм	1...30 кОм	47 кОм		0,1 мА
1...30 мкСм	0,03...1 МОм	1,5 МОм		3 мкА

При использовании в резистивном делителе одного образцового сопротивления (R_i) невозможно получить высокую точность измерения в большом диапазоне концентраций растворов. Для увеличения точности измерений коммутируются различные образцовые сопротивления. Ниже приведена таблица диапазонов измерения с относительной погрешностью измерения не более 1 % при измерении напряжения 11-битными АЦП.

Ввиду большой стоимости платины, кондуктометрическая ячейка была изготовлена из нержавеющей жаропрочной стали марки 08X18H10T. В результате измерения удельной проводимости растворов KCl с концентрацией 0,01...1 М вышеописанным способом относительная погрешность не превысила 5 % по сравнению с табличными значениям удельной проводимости при температуре 25 °С.

Таким образом, разработанный способ имеет преимущества перед традиционными способами измерения проводимости, так как не требует подключения кондуктометрических ячеек с различными параметрами и обеспечивает одинаковую погрешность измерения в заданном измерительном диапазоне.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ (РВС) МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Дергачев А.Н.

ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия

При проектировании РВС полагают, что их ресурс будет изменяться в соответствии с гипотезой линейного накопления усталостных повреждений, заключающейся в том, что повреждение, вызываемое данным циклом напряжений, не зависит от состояния материала в данный момент и от предыдущей истории нагружения, а просто суммируется с повреждениями, вызванными предыдущими циклами.

Анализ работ, посвященный этой теме, показывает, что это не всегда верно. Так, при нагружении образца из стали 09Г2С, часто используемой при изготовлении РВС, наблюдается линейный характер накопления усталостных повреждений. Однако, при приближении величины накопленного усталостного повреждения к предельному (по моменту возникновения макротрещин) значению наблюдается сравнительно резкое отклонение от линейного закона. Такая же закономерность наблюдалась на образцах из различных материалов, испытанных при регулярном нагружении. По данным испытаний сварных соединений малоуглеродистой стали уже на начальном этапе нагружения заметно отклонение от линейного накопления усталостных повреждений.

Для малоциклового нагружения характерно формирование и последующее развитие в зонах концентрации напряжений и деформаций трещин усталостного происхождения вследствие преимущественного протекания в них процессов циклического упругопластического деформирования.

Очевидно, что резервуары, работающие при большой цикличности, более чувствительны к концентраторам напряжений, в том числе и к локальным геометрическим отклонениям, которые в результате длительных повторно-циклических нагрузок являются источниками усталостных повреждений.

Однако, имеющиеся в настоящее время нормативные документы по расчету остаточного ресурса, в частности РД 153-112-017-97, предполагают лишь малоцикловое нагружение.

Долговечность сварных соединений зависит от накопления усталостных повреждений и определяется величиной и повторяемостью действующих нагрузок. Необратимые сдвиговые деформации накапливаются у отдельных очагов. Обычно ими служат микродефекты металла.

С увеличением числа циклов нагружения прирост накопления усталостного повреждения всегда больше в тех соединениях, в которых раньше обнаруживаются первые признаки сдвиговых деформаций.

При низких уровнях переменного нагружения усталостные повреждения в сварных соединениях накапливаются дифференцированно по свойствам микроструктуры металла. Высокие переменные нагрузки нивелируют свойства микроструктуры и вызывают быстрое и равномерное повреждение микрообъемов металла. Это важное положение позволяет сделать вывод, что такие дефекты сварки, как одиночные поры, включения, подрезы, могут не проявить своего влияния при высоких нагрузках, но привести к заметному снижению сопротивления усталости соединений при низких нагрузках.

Несмотря на имеющееся многообразие методов выявления дефектов, процесс технического диагностирования во многом затруднен по причине несовершенства нормативно-технической документации. Сюда следует отнести различия норм допустимости дефектов, а также несовершенный подход к выбору средств и методов контроля сварных соединений РВС.

Часто, содержащиеся в документах нормы допустимости дефектов (включения, поры, шлаковые включения, непровары, подрезы и др.), отли-

чаются друг от друга в несколько раз. Различий не существует только по отношению к трещинам: их, как правило, не допускает не один документ.

Выбор метода контроля тоже не всегда четко регламентирован, что приводит к возможности двоякой трактовке документа.

Проанализировав ряд документов, можно сделать следующие выводы: для контроля внутренних дефектов в основном применяется ультразвуковой и рентгенографический контроль, для контроля поверхностных дефектов – магнитопорошковая или цветная дефектоскопия, лишь в одном документе упомянут метод акустической эмиссии для контроля уторного шва резервуара.

Другой момент, который стоит отметить, состоит в том, что все документы, регламентирующие проведение неразрушающего контроля сварных соединений РВС акцентируют внимание непосредственно на швах, упуская из вида околошовную зону, где часто и происходит разрушение.

Важным вопросом при проведении технического диагностирования является вероятность выявления дефектов. Складывается она из многих факторов, таких как: чувствительность того или иного метода неразрушающего контроля к данному типу несплошностей, надежность и правильный выбор дефектоскопического оборудования, используемого для контроля, методика проведения работ, компетентность дефектоскописта, его психофизиологическое состояние, внешние факторы и др.

Повысить достоверность контроля можно путем влияния на вышеназванные факторы. Самым простым методом является увеличение числа проверок. Тогда, вероятность выявления дефекта будет меняться по формуле: $P = 1 - (1 - P_n)^m$, где P_n – вероятность выявления дефекта по результатам одного контроля, m – количество проверок. Или, иными словами, вероятность «пропустить» дефект: $P_n = (1 - P)^m$.

Обеспечение безопасной работы РВС является комплексной задачей, включающей в себя как систему технического диагностирования, так и ряд организационных мероприятий, направленных на исключение факторов, снижающих уровень эксплуатационной безопасности резервуаров.

ПРЕЗЕНТАЦИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ»

Решетов А.А.

*ГОУ ВПО «Московский государственный университет
приборостроения и информатики», Москва, Россия*

Современная деятельность человека невозможна без применения методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики (НК и ТД) в самых разных областях жизни, что способствует предупреждению инцидентов, аварий и катастроф или уменьшению их последствий [1]. Поэтому в ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им.

И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары) разработана и внедрена дисциплина «Не разрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов» для студентов специальности 140104 – Промышленная теплоэнергетика.

Работа посвящена разработке и внедрению учебного пособия «Не разрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов» для студентов всех технических вузов [2].

Основные результаты.

Целью преподавания дисциплины «Не разрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов» для студентов технических вузов является формирование квалификации специалиста, способного технически грамотно применять на практике информационные методы и средства НК и ТД состояния энергетических объектов. В дальнейшем специалист должен подтвердить полученное образование, специальные знания, навыки, опыт и физическую пригодность при аттестации (сертификации).

Предлагаемое учебное пособие [2] содержит двадцать глав по общим сведениям о методах и средствах НК и ТД энергетических объектов: ультразвуковом, радиационном, акустико-эмиссионном, магнитном, вихретоковом, проникающими веществами (капиллярный и течеискание), визуальном и измерительном, вибродиагностическом, электрическом, тепловом, оптическом, радиоволновом, а также методах экологической и террористической диагностики. Даны рекомендации по выбору и применению методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики на промышленных и транспортных объектах.

В пособии представлены результаты научных исследований по разработке расчетно-экспериментальных методов вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования:

- метод тестового вибродиагностического контроля для анализа свободных колебаний системы;
- метод вибродиагностического контроля энергетического оборудования на основе показателей чувствительности узлов к возбуждающим колебаниям воздействиям.

В отличие от существующих методов вибродиагностического НК (метод анализа огибающей вибросигнала на резонансных частотах самого механизма; метод безразмерных S -дискриминантов вибрации оборудования и другие) предлагаемые методы основаны на применении расчетных спектральных «портретов» объекта диагностирования, существенно облегчающих прогнозирование зарождающихся дефектов по структуре изделия. Инерционные характеристики задаются в простейших случаях списками инерционных элементов, отражающих вращательные движения тел вращений. Линейные силы упругости описываются упругими элементами. Введенные таким образом элементы и твердые тела имеют в своем составе геометрическую (кинематическую) и физическую части. Первая включает переменные (координаты), описывающие обобщенные координаты и пере-

мещения объектов механической модели, вторая отражает физические характеристики – инерционные и упругие свойства (определяемые по компьютерной программе).

Для вынесения заключения об отсутствии или наличии дефекта, а также его развитии необходимо сравнить расчетную априорную информацию (расчетный спектральный «портрет», определяемый по компьютерной программе) с апостериорным спектральным «портретом» на основе виброакустического канала.

Разработанные методы и средства позволяют повысить эффективность вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования путем обнаружения и устранения врожденных, зарождающихся и развитых дефектов, причин повреждений и/или разрушений узлов оборудования.

Примерами использования данных методов и средств является вибродиагностический контроль: промышленных тракторов, дизель-генераторов и судовых энергетических установок на базе дизелей семейства ЧН16.5/18.5, турбоустановок, насосных станций с синхронным электроприводом, питательных центробежных насосов ТЭЦ с асинхронным электроприводом, погружных центробежных насосов для добычи нефти с асинхронным электроприводом, газоперекачивающих агрегатов с синхронным электроприводом.

Обсуждение результатов.

Уровень развития стран мира характеризуется показателями качества, надежности и безопасности изделий, оборудования предприятий и энергетических объектов. Достижение этих показателей, предотвращение инцидентов и аварий различных объектов немислимо без эффективных методов и средств НК и ТД. Основа безопасности любой организации – оснащение ее кадрами и средствами технической диагностики (с необходимым финансированием контрольно-диагностического сопровождения). Если это обеспечивается, то тогда можно гарантировать и безопасность объекта. Если же этого нет, то получается результат, аналогичный аварии, происшедшей 17 августа 2009 г. в филиале ОАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного».

Управление безопасностью в нашей стране основано на выполнении требований ряда нормативных правовых актов (федеральных законов), определяющих правовые, экономические и социальные основы обеспечения условий и охраны труда, промышленной, пожарной, электрической и электромагнитной безопасности, технического регулирования, охраны окружающей среды, требований гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций.

В рамках Единой системы оценки соответствия на объектах, подконтрольных Ростехнадзору, осуществляет свою деятельность Система неразрушающего контроля на опасных производственных объектах. Управление Системой неразрушающего контроля основано на аттестации (сертифика-

ции) персонала, лабораторий, методических документов и средств неразрушающего контроля.

Для подготовки специалистов с современным уровнем квалификации необходимо изучать информационные методы и средства НК и ТД состояния энергетических объектов студентами вузов всех технических специальностей, работниками служб контроля, эксплуатации и ремонта оборудования организаций топливно-энергетического комплекса, работниками опасных производственных объектов, органов государственного (ведомственного) надзора и контроля [2].

В результате изучения данной дисциплины специалист должен знать: современные методы и средства НК и ТД энергетических объектов, а также направления их развития; значение мониторинга и диагностики для технологической, экологической и террористической безопасности.

Литература

1. **Неразрушающий контроль:** справ.: в 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003–2005.

2. **Решетов А.А.** Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов: учеб. пособие / А.А. Решетов, А.К. Аракелян; под ред. проф. А.К. Аракеяна. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. 470 с.

К ВОПРОСУ О МЕТРОЛОГИИ СРЕДСТВ ТНК

Ковалев А.В., Матвеев В.И.

ЗАО «НИИИИ, МНПО «Спектр», Москва, Россия

При использовании тепловизоров в качестве портативных средств теплового неразрушающего контроля (ТНК), особенно для целей дефектоскопии и дефектометрии материалов и конструкций, возникает естественная необходимость метрологического обеспечения проверки работоспособности и чувствительности этих эффективных диагностических средств.

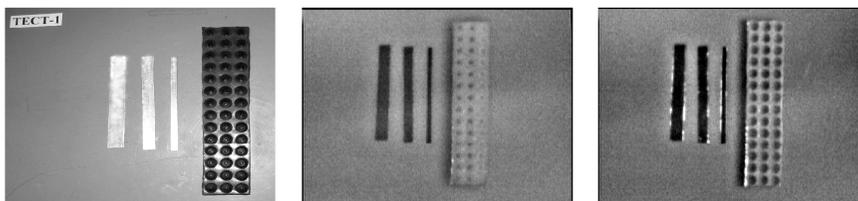
Для метрологической оценки основных параметров тепловизоров при их разработке, производстве и сравнительных испытаниях чаще всего применяют различные типы эталонов абсолютно черных тел, которые сами по себе непростые и достаточно дорогостоящие.

Для метрологической проверки тепловизоров перед началом их работы могут быть разработаны и использованы стандартные образцы предприятия-пользователя на тот или иной вид дефекта, например с нормированным искусственно созданным расслоением в образце диэлектрической со-

товой конструкции. В качестве третьего варианта - могут быть применены специальные тест-образцы.

Предлагаемые тест-образцы основаны на физике теплообменных процессов – использовании различных теплоизлучающих, теплоотражающих и теплопоглощающих материалов, закрепленных на единой поверхности. В качестве примера приводится образец ТЕСТ-1, выполненный из оргстекла зеленого цвета для уменьшения теплового фона, на котором закреплены два вида материалов: с высокими отражающими свойствами – алюминиевая фольга, и с высоким поглощением – черная резина. Алюминиевая фольга наклеена в виде трех полосок разной ширины и с одинаковым шагом, а черная резина в виде прямоугольной полосы с равномерно распределенными в ней глухими отверстиями. Такого рода образец позволит оценить температурную чувствительность и геометрическую разрешающую способность тепловизора.

На приводимом ниже рисунке показаны три изображения: фотография образца ТЕСТ-1 (слева), тепловизионные изображения образца в пассивном режиме (в центре) и в активном режиме (справа).



Тепловизионные изображения показывают геометрию наклеенных материалов, а главное то, что отражающие алюминиевые полоски стали черными, более холодными, а поглощающая полоса резины – светлой, т.е. более теплой. На фоне этой светлой полосы четко видны равномерно расположенные и менее поглощающие глухие отверстия.

Следуя предложенному способу, возможно создание различных типов тест - образцов из простых доступных материалов, имитирующих те или иные свойства тепловых процессов, а также тест-образцы с местами увлажнения для проверки чувствительности на выявляемость в объектах зон скопления воды. Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований, подтверждающие этот принцип.

Литература

1. ГОСТ 23483–79. Методы теплового вида. Общие требования.
2. Вавилов В.П., Климов А.Г., Ширяев В.В. Активный тепловой контроль воды в авиационных сотовых конструкциях. «Дефектоскопия», 2002 г. № 12.С. 73–84.

О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ НДС

Дубов А.А.¹, Коновалов Н.Н.²

¹ООО «Энергодиагностика», Москва, Россия

²ОАО «НТЦ Промышленная безопасность», Москва, Россия

На сегодняшний день актуальность оценки НДС встречает все большее понимание у специалистов в области обеспечения промышленной безопасности. Тема контроля напряженного состояния в настоящее время важна, как для контроля качества изделий машиностроения, так и в эксплуатации при оценке ресурса оборудования.

В 2009 году введен в действие соответствующий национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 9712–2009 «Контроль неразрушающий. Аттестация и сертификация персонала».

В связи с вводом в действие указанных стандартов в Единой системе оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности в энергетике и строительстве разработано в 2010 году «Положение об аттестации персонала в области неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния» (СДОС-05–2010).

В Положении изложены требования к квалификации персонала I, II и III уровней в области неразрушающего контроля (НК) напряженно-деформированного состояния (НДС). Аттестации подлежит персонал, проводящий контроль объектов с применением следующих методов НК НДС: ультразвукового, радиационного, магнитного, вихретокового, визуально-измерительного, оптического, тензометрического.

В перечень методов НК НДС включены в первую очередь методы, на которые имеются национальные стандарты и другие руководящие документы. В дальнейшем этот перечень может изменяться и дополняться.

В связи с вводом в действие указанного «Положения» в настоящее время требуется выполнить большой комплекс организационно-технических работ:

- организация сети независимых органов по аттестации персонала (НОАП) и независимых органов по аттестации лабораторий (НОАЛ) в области НК НДС;

- аттестация ведущих специалистов в области НК НДС на III уровень с тем, чтобы они могли включиться в работу по аттестации других специалистов на I и II уровни;

- разработка Программ обучения и экзаменационных билетов по каждому методу НК НДС;

- разработка специализированных стендов эталонных образцов для обучения и сертификации средств НК НДС;

- проведение семинаров для ознакомления широкого круга специалистов и, в первую очередь, специалистов по НК и экспертов в области ПБ с целями и задачами НК НДС.

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ И СЕРТИФИКАЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ В ИЖЕВСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Муравьев В.В.

*Ижевский государственный технический университет,
Ижевск, Россия*

В 1978 году Госкомитет по науке и технике СССР принял решение по развитию новых и перспективных средств и методов неразрушающего контроля и открытию соответствующей учебной специальности для получения высшего образования. В число ВУЗов страны, где предполагалось открытие специальности, был включен и Ижевский механический институт. В 1981 г. проведен первый набор 27 студентов на специальность 0653 Физические методы и приборы неразрушающего контроля с квалификацией выпускников инженер-физик.

Уже более четверти века кафедра «Приборы и методы контроля качества» ИжГТУ готовит специалистов в области приборов и методов неразрушающего контроля, технической и медицинской диагностики. За этот период подготовлено более 1 тысячи специалистов, которые успешно трудятся на предприятиях Удмуртии – ОАО ИРЗ, ОАО ИМЗ Аксион-холдинг, ФГУП ИМЗ, ОАО ИЭМЗ Купол, ОАО Ижсталь, ОАО Ижмаш, ОАО Буммаш, ОАО Нефтемаш, ОАО ЧМЗ, ФГУП Воткинский завод; в академических организациях – ФТИ УРО РАН, ИПМ УРО РАН, ИФМ УРО РАН, в организациях ООО Газнадзор, ООО Пермтрансгаз, ООО ЭНТЭ, ЗАО Запдноуральский центр сертификации, ЗАО Альтон, ООО Стрела.

Среди выпускников кафедры 2 доктора и 18 кандидатов наук, руководители промышленных предприятий и организаций, лабораторий неразрушающего контроля, центральных заводских лабораторий, отделов технического контроля и метрологии.

В настоящее время на кафедре трудятся 5 докторов и 9 кандидатов наук. Под их руководством успешно развиваются научные направления:

1. Магнитные методы и средства неразрушающего контроля, технической диагностики, экологического мониторинга;
2. Акустические методы и средства неразрушающего контроля, технической и медицинской диагностики;
3. Технологии акустической структуроскопии и диагностики опасных производственных объектов;
4. Математические модели динамических испытаний и вибродиагностика машин и оборудования;
5. Взаимодействие физических излучений с биологическими структурами различного уровня организации.

Созданы три научно-образовательных центра: Неразрушающий контроль, диагностика, структуроскопия. Биомедицинские системы и технологии. Экологический стационар.

Сегодня на кафедре функционируют 7 учебных и 3 научные лаборатории, оснащенные современными приборами и оборудованием, в которых обучаются бакалавры по направлению 200100 «Приборостроение», студенты по специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики», магистранты по программам 200100.68–91 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и 200100.68–92 «Приборы, системы и изделия биомедицинского назначения».

При кафедре действует аспирантура по специальностям: «Методы контроля и диагностика в машиностроении», «Приборы и методы измерений по видам измерений», «Геоэкология», «Приборы, системы и изделия медицинского назначения».

Разработки кафедры внедрены на различных промышленных предприятиях региона и России. Среди внедренных разработок следует отметить акустические дефектоскопы насосных штанг (АДНШ), насосно-компрессорных труб (АДНКТ), прутков (АДП) и эхолоты ЭХО-2, основанные на новой технологии акустической дефектоскопии протяженных объектов, магнитометры ИГМП-3, толщиномеры упрочненных слоев СКИФ-3, приборы для разбраковки по маркам стали ТЕРМ-1.

В 2008 г. в Ижевском государственном техническом университете организован Уполномоченный орган и экзаменационный центр по сертификации персонала в области неразрушающего контроля технических объектов железнодорожного транспорта в соответствии с «Правилами сертификации персонала по неразрушающему контролю технических объектов железнодорожного транспорта». Это пятый уполномоченный орган в России, работающий по правилам ПР 32.113. Центр прошел аккредитацию Ростехрегулирования и головной организации ОАО РЖД «НК-центр» в ноябре 2008 г. (РССП рег. № РОСС RU.0001.03Н300 О-23; ССПНК ЖТ.УО № 005) и расширение области аккредитации в ноябре 2010 г.

Область сертификации – акустический (ультразвуковой), акустико-эмиссионный, магнитный и вихретоковый виды (методы) контроля в секторах железнодорожного транспорта и машиностроения и металлопроизводства. Среди объектов железнодорожного транспорта – вагоны, локомотивы, металлические сварные мосты, рельсы и стрелочные переводы в эксплуатации и при изготовлении.

Центр оснащен необходимыми экзаменационными образцами с естественными и искусственными моделями дефектов и необходимым количеством дефектоскопов для проведения практических экзаменов. Экзаменационный центр располагается в шести помещениях общей площадью 130 кв.м. В Центре работают по 3 специалиста 3-го уровня по каждому ви-

ду контроля и специалисты 2-го уровня по соответствующим видам и объектам контроля.

Большинство специалистов, прибывающих на сертификацию, работают на предприятиях вагонного хозяйства. Это второй центр в России, занимающийся аттестацией специалистов по акустико-эмиссионному контролю литых деталей в вагонном хозяйстве, поэтому наибольший объем сертификаций приходится на этот метод.

По каждому виду контроля планируется от двух до четырех сертификаций в год. Перед экзаменами проводятся консультации в объеме 40 часов, затем три экзамена – теоретический, специальный и практический. После теоретического и специального экзаменов комиссия проводит собеседование индивидуально с каждым претендентом.

Со времени открытия Центра к 2011 г. прошли сертификацию специалисты вагонных ремонтных депо и заводов по заявленным видам контроля в количестве 433 человек с Горьковской, Московской, Северной, Октябрьской, Северо-Кавказской, Южно-Уральской, Юго-Восточной, Приволжской ДРВ, а также предприятий производящих новые изделия для ЖД транспорта и ремонтных предприятий Брянска, Владикавказа, Выксы, Ижевска, Камбарки, Перми и др. Из них на первый уровень сертифицированы 65 человек, на второй – 372. По акустическому контролю сертификацию прошли – 87 человек; по акустико-эмиссионному – 191; по магнитному – 92, по вихретоковому – 69.

Адрес Уполномоченного органа:

426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7. (УОСП).

Адрес Центра: 426069, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 30.

Электронный адрес: uosp@mail.ru.

Телефон, факс (3412)588897, (3412)618281.

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» (Рег. номер: 2.1.2/12069).

СЕКЦИЯ № 7. НК В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Руководители секции: Гречишников В.М., Кудрявцев И.А.,
Бобров В.Т.

ДИАГНОСТИКА ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТИЦ ИЗНОСА

Кудрявцев И.А., Поминов Е.И., Корнилин Д.В.
ГОУ ВПО СГАУ им. акад. С.П. Королёва, Самара, Россия

Жидкостные системы в настоящее время получили широкое распространение в промышленности, энергетике и транспорте, благодаря целому спектру особенностей, обуславливающих высокую эффективность передачи значительных усилий с высокой точностью. Эффективность гидравлических систем увеличивается с ростом рабочего давления, что заставляет разработчиков создавать соответствующие агрегаты с малыми зазорами, обеспечивающими требуемые параметры. Малые зазоры, с одной стороны, требуют высокой чистоты рабочей жидкости, с другой являются «слабым местом» системы в целом, что требует эффективных средств мониторинга и предупреждения аварийных ситуаций. Одним из наиболее эффективных средств диагностики жидкостных систем является контроль параметров дисперсной фазы или частиц износа, генерируемых в рабочую жидкость узлами трения. Такая диагностика может производиться оперативно, в процессе эксплуатации системы, исключая ее остановку и связанные с этим потери времени и средств. Анализируя динамику изменения таких параметров, как концентрация и гранулометрический состав, можно сделать выводы об износе отдельных агрегатов системы и остаточном ресурсе системы. Традиционно существуют два подхода к диагностике параметров рабочей жидкости гидравлических систем: по результатам анализа отобранных проб и с помощью встроенных в систему датчиков. Применение встроенных датчиков позволяет избежать дополнительных погрешностей при отборе проб, потерь жидкости, а также непосредственного контакта персонала с рабочей жидкостью, что особенно актуально при использовании токсичных материалов, например, гидравлических жидкостей типа НГЖ. Применение встроенных датчиков, таким образом, является предпочтительным при контроле авиационных гидравлических систем, работающих при высоких рабочих давлениях и требующих высокой чистоты рабочей жидкости.

Отраслевая научно-исследовательская лаборатория ОНИЛ-16 Самарского государственного аэрокосмического университета накопила значи-

тельный опыт разработки устройств диагностики жидкостных систем по параметрам дисперсной фазы. Разработан спектр устройств, в котором имеются анализаторы отобранных проб жидкости, а также устройства на основе датчиков встроенного контроля (ДВК), обеспечивающие решение проблем мониторинга состояния рабочей жидкости для различных условий эксплуатации. Так, например, для контроля жидкостей с высоким уровнем загрязнения, а также в условиях, когда необходим эпизодический контроль, целесообразно применение анализаторов отобранных проб, позволяющих осуществлять разбавление образцов и совмещать контроль концентрации и гранулометрического состава загрязнения с другими методами, например, микроскопическим исследованием. В случаях контроля состояния систем высокого давления, при необходимости постоянного мониторинга технического состояния, при работе с токсичными жидкостями, и при контроле жидкостей высокой степени чистоты предпочтительно применение датчиков встроенного контроля. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, наиболее подходящим методом диагностики является фотоэлектрический, определяющий параметры дисперсной фазы по изменениям светового потока, однако, такой метод имеет ограничения, связанные с невозможностью определения материала дисперсной фазы и невозможность работы в неоднородных средах типа эмульсий.

При необходимости устройства на базе фотоэлектрического метода могут быть применены совместно с анализаторами других типов, например, вихретоковым, позволяющим различать материал частиц в зависимости от их магнитных свойств. Например, возможно различать частицы из магнитных (сталь, чугун) и немагнитных (латунь, бронза, баббит) материалов.

В заключение необходимо отметить, что развитие современной электроники позволило обеспечить разработанные средства контроля набором сервисных функций, например, беспроводными каналами передачи диагностической информации, улучшающими эксплуатационные характеристики.

РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗУБЧАТОЙ ЛЕНТЫ ХВОСТОВОЙ БАЛКИ ВЕРТОЛЕТОВ МИ-2

Коротеев М.Ю., Соломенчук П.В.

ЗАО «Константа», С.-Петербург, Россия

Доклад посвящен вопросам диагностирования зубчатой ленты хвостовой балки вертолета Ми-2 и разработке средств НК для проведения указанного контроля.

Для уменьшения веса конструкций в вертолетостроении в качестве хвостовой балки, несущей дополнительный винт применяется трубчатая конструкция, изготовленная из алюминиевого сплава. Она представляет собой формованные алюминиевые листы, соединенные вместе заклепками с применением соединительной зубчатой ленты и лонжерона, усиливающего конструкцию. При длительной эксплуатации вертолета, под воздействием вибраций и коррозионной среды, в зубчатой ленте возникают трещины, что уже приводило к крушениям вертолетов.

Для обеспечения безопасной эксплуатации вертолета необходимо проводить контроль средствами НК. В качестве наиболее подходящего, применен вихретоковый фазовый метод НК.

Стык листов обшивки верхнего слоя, под которым располагается искомый дефект, оказывает сильное маскирующее воздействие на сигнал ВТП, а несколько слоев краски и грубая поверхность стыка являются мешающими параметрами. Для уменьшения влияния маскирующего воздействия стыка используется характерное свойство ВТП – наличие мертвой зоны (зоны нечувствительности ВТП к мелким поверхностным дефектам), которая намеренно значительно увеличена. Для уменьшения влияния изменения толщины краски применен фазовый метод с балансировкой по отстройке от зазора с использованием схемы электрической балансировки ВТП.

В докладе приведены структурная схема преобразователя и его конструкция, методики подавления мешающих параметров и маскирующих воздействий. Также изложены результаты моделирования и испытаний разработанного ВТП в комплекте с дефектоскопом Константа ВД1 на контрольных образцах и реальных деталях.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Шкода А.С.¹, Коптев А.Н.²

¹*ЗАО «АК«Полет» Ульяновск, Россия*
²*СГАУ им. С.П. Королёва, Самара, Россия*

Доклад посвящен вопросам оперативной оценки технического состояния авиационных сотовых конструкций с применением методов неразрушающего контроля в условиях авиационно-технических баз.

С середины 80-х годов начали эксплуатироваться воздушные суда (ВС), в конструкциях которых нашли широкое применение (около 30 % по площади фюзеляжа и крыла) сотовые конструкции (СК). В настоящее время внедряются в серийное производство широкофюзеляжные пассажирские самолеты, в которых до 70...80 % конструктивных элементов выполнено из композиционных материалов.

Основным видом дефектов таких конструкций, существенно снижающих их прочность, является нарушение сплошности соединений слоев между собой. Дефекты соединений могут представлять собой локальные расщепления с газовой прослойкой между слоями, локальные непроклеи из-за неправильного нанесения клеевого слоя (когда механический контакт между слоями есть, но соединение отсутствует) и локальные участки с плохой адгезией клеевого слоя из-за некачественной подготовки поверхностей склеиваемых слоев (наличие жировых пятен и загрязнений).

Несмотря на наличие большого числа современных методов, таких как ультразвуковой, магнитный, радиационный, вихретоковый, тепловой и др., и средств, способных выявить основные дефекты сотовых конструкций, на эксплуатирующихся предприятиях сотовые конструкции контролируются преимущественно при помощи метода свободных колебаний (простукивание изделия с регистрацией изменений характера звука на слух). Это связано с тем, что новейшие средства неразрушающего контроля (НК) требуют как значительных финансовых затрат, связанных с их приобретением, так и существенно увеличивают трудоемкость выполняемых работ. В связи с этим современные средства используются лишь для уточнения размеров дефектов при ремонте. В результате из-за несовершенства методов и методик контроля технического состояния СК происходит увеличение простоев летательных аппаратов (ЛА) на техническом обслуживании, что значительно снижает эффективность их использования.

При оперативной диагностике важно иметь возможность быстро оценить либо наличие, либо отсутствие дефекта максимально допустимой величины, а также дать прогноз на период до следующей проверки. При этом необходимо принять решение о дальнейшей эксплуатации агрегата или же о его замене и отправке в ремонт. Точные размеры и расположение дефекта определяются при ремонте.

Существующие теоретические разработки и практические методики по диагностированию элементов планеров ВС направлены в основном на решение задач определения точных размеров и локализации дефектных областей, что неизбежно влечет за собой значительное увеличение трудоемкости и, как следствие, низкую эффективность при оперативном техническом обслуживании.

Наиболее перспективным для целей оперативной диагностики является ударно-акустический метод (называемый также «методом свободных колебаний»). Суть метода заключается в том, что по поверхности контролируемого изделия наносятся механические удары и с того же участка поверхности снимается сигнал, определяемый упругими колебаниями, возбуждаемыми в контролируемом изделии этим ударом.

Суть предлагаемого метода состоит в том, что в процессе жизненного цикла объекта через определенные интервалы времени имитируются тестовые динамические воздействия в его контрольных точках, позволяющие по

откликам конструкции на эти возбуждения судить о наступлении, с течением времени, предотказного состояния.

Так у СК при действии на них гармонических возбуждений в некотором частотном диапазоне из-за накопления в процессе эксплуатации повреждений (появления зон «непрокля») происходит изменение жесткостных характеристик конструкции. Это приводит к изменению пиковой амплитуды отклика. Кроме того, при этом наблюдается, фиксируемый датчиками, явный дрейф частот резонансных явлений, что в совокупности с применением вейвлет-преобразования для анализа сигнала полученного отклика конструкции позволяет сформировать критерий оценки предотказного состояния объекта и создать прототип комплекса для его диагностирования. В качестве базовых амплитуды и частоты резонанса для оценки технического состояния могут быть успешно использованы расчетные значения или значения, замеренные и сохраняемые для каждого устройства перед началом его эксплуатации. Расчетные значения могут быть получены как с применением модели, построенной при помощи теории колебаний, так и конечно-элементной модели.

При этом на основании совокупности информации об объекте ставится задача экстраполировать его поведение в будущем и установить оптимальный момент для проведения очередной проверки технического состояния (ТС) или прекращения эксплуатации данного объекта.

В основу метода положен анализ свободных колебаний возбуждаемых механическим ударом в контрольных точках. При этом средствами преобразования и регистрации производится запись сигнала вибрации. Для исключения случайных погрешностей производится серия измерений.

После этого из полученного сигнала при помощи быстрого преобразования Фурье получаем примерные значения собственных частот колебаний. Далее при помощи непрерывного вейвлет-преобразования производится определение достаточно точных значений модальных параметров на собственных частотах колебаний. По найденным значениям собственных частот колебаний и коэффициентов демпфирования производится расчет диагностического параметра: $K = \frac{\xi}{\omega}$.

После чего полученное значение параметра сравнивается с максимально допустимой величиной для данной конструкции: $K < [K]$.

В случае превышения экспериментально полученным значением диагностического параметра максимально допустимой величины объект контроля снимается с эксплуатации. При выполнении условия безотказной работы выполняется занесение полученного значения диагностического параметра в базу данных, для получения динамики его изменения с наработкой. После этого выполняется статистический анализ и определяется наработка изделия до следующей проверки.

УСТРОЙСТВО КУЛОНОМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ЖИДКОСТЯХ

Потудинский А.А., Кудрявцев И.А.

СГАУ им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам исследования погрешности измерений влагосодержания в технологических жидкостях, используемых в авиационной и космической промышленности. В виду интенсивное развитие современной авиационной и космической техники диктуются особые требования к качеству используемых горюче-смазочных материалов (ГСМ), от которых зависит безаварийная эксплуатация и долговечность работы. В частности, в настоящее время очень высокие требования предъявляются к авиационным горюче-смазочным материалам. Так, содержание растворенной влаги в авиационном керосине не должно превышать 0,01 % от общей массы керосина.

Для автоматического контроля микроконцентраций гигроскопической, сорбированной и кристаллизационной воды в ГСМ было предложено использовать метод кулонометрического титрования реактивом Фишера, который реализован в автоматическом анализаторе «АКВА-901», разработанном в ОНИЛ-16 СГАУ.

При кулонометрическом титровании через раствор пропускается генераторный ток для получения электролизом активного вещества реагирующего непосредственно с водой. Тем самым определив количество электричества, затраченного на электрохимическую реакцию, возможно, определить внесенное количество воды. Поскольку генераторный ток стабилизирован и строго определенной величины, то для определения количества электричества достаточно измерить лишь время титрования. При этом точность определения количества оттитрованной воды зависит от погрешности определения конечной точки титрования. Данная погрешность имеет систематическую составляющую, определяемую параметрами преобразователя тока в напряжение, и случайную, определяемую флуктуациями напряжения на индикаторных электродах, обусловленными различными внешними факторами, такими как, неравномерность обтекания электродов реактивом, скорость перемешивания раствора, дрейф побочных продуктов химической реакции из катодного отсека в анодный. Систематическая погрешность автоматически компенсируется, с помощью специальных алгоритмов коррекции.

Были проведены экспериментальные исследования изменения воздействий на результаты измерений внешних факторов. Полученные результаты позволяют определить наиболее оптимальную скорость перемешивания,

при которой флуктуации индикаторного напряжения наименьшие, при постоянных прочих факторах. Оценена скорость диффузии побочных продуктов реакции через мембрану. Разработан и предложен алгоритм компенсации этого дрейфа, поддержания реактива в рабочем состоянии на протяжении достаточно длительного времени.

В результате предложенных алгоритмов проведения измерений погрешности измерений, было обеспечено более точное определение конечной точки титрования и снижение систематической погрешности определения содержания влаги в ГСМ до 15 %.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПКМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕВЕРБЕРАЦИОННО- СКВОЗНОГО МЕТОДА

Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А.

ФГУП «ВИАМ», Москва, Россия

С 2010 года во ФГУП «ВИАМ» проводятся исследования, направленные на неразрушающий контроль элементов конструкций из ПКМ реверберационно-сквозным (РСкв) методом. В иностранной литературе метод называется акустико-ультразвуковым (acousto-ultrasonic technique). РСкв метод сочетает в себе признаки метода прохождения и УЗ-реверберационного (эхореверберационного) метода и благодаря многократному прохождению УЗ-волн через объект контроля (ОК) позволяет выявлять мелкие структурные неоднородности, определять степень поврежденности и изменение прочностных свойств ПКМ.

Разработки ФГУП «ВИАМ» направлены главным образом на определение степени поврежденности и степени накопления микрповреждений элементов конструкций из ПКМ после их изготовления и в процессе эксплуатации, а также на определение прочностных свойств материала. Информативным параметром метода служит затухание многократно отраженных УЗ-импульсов, вызванное различными неоднородностями структуры материала ОК. Количественно это затухание (по иностранной литературе) оценивают критерием, который называется SFW (stress wave factor). Существуют различные способы вычисления критерия SWF. Применение того или иного способа зависит главным образом от формы получаемых РСкв сигналов, особенностей исследуемого ОК (его размеров, формы и материала, из которого он изготовлен), характера повреждений и свойств ОК, которые необходимо определить или оценить.

Основные способы вычисления критерия SWF, применяемые за рубежом, описаны в американском стандарте ASTM E1495 – это амплитудный способ, счетный и энергетический. Все эти способы имеют существенный

недостаток – при обработке не полностью используется полезная информация, содержащаяся в сигнале. Получаемые РСкв сигналы зачастую содержат спектральные составляющие, информативность которых различна для определяемых свойств ПКМ. Некоторые составляющие, не несущие полезной информации, сильно подвержены влиянию мешающих факторов – собственных шумов аппаратуры, температуры, степени влагонасыщения и др. Нами был предложен способ, наиболее полно использующий информацию, содержащуюся в спектре полезного сигнала.

С помощью ПК в системе MathCAD были реализованы математические алгоритмы вычисления SFW всех вышеперечисленных способов (американских и предложенного). С 3-х образцов из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 (из расплавленного клеевого препрега КМКУ-3.150.Э0,1,45 на основе наполнителя – углеродной ленты ЭЛУР-П и связующего ВСК14-3) размерами 220х220 мм и толщиной 10 мм со схемой выкладки 0°/90° с различной прочностью – $\sigma_{и1} = 530$ МПа, $\sigma_{и2} = 470$ МПа и $\sigma_{и3} = 445$ МПа были получены по 22 РСкв сигнала (в разных точках каждого образца с двух сторон). Различные значения прочностных характеристик были получены варьированием состава материала (соотношением основных компонентов) при изготовлении этих образцов. Для снятия сигналов использовалась аппаратура для РСкв метода, разработанная совместно со специалистами Ульяновского филиала ФГУП «ВИАМ» (УНТЦ) – универсальная плата ультразвукового приемника на основе ПЛИС (FPGA) и генератор зондирующих импульсов, а также стандартные прямые широкополосные преобразователи Olympus NDT V103 с рабочей частотой 1 МГц.

Для каждого образца вычислялось по 22 значения критерия SWF, а затем вычислялось среднее значение по всему образцу для выявления корреляционных связей. Все способы показали хорошую корреляцию критериев SWF с прочностью данных образцов. Методами математической статистики оценена эффективность применения способов определения SWF (амплитудного, счетного, энергетического и предложенного способа) для данного типа образцов. Проведенная оценка показала, что предложенный способ работоспособен и обладает более тесной, по сравнению с известными аналогами, корреляцией с прочностными характеристиками материала.

ДИАГНОСТИКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ДЕТАЛЯХ И КОНСТРУКЦИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Мурашов В.В., Мишуrow К.С., Сорокин К.В.
ФГУП «ВИАМ», Москва, Россия

Безопасность полетов на летательных аппаратах зависит от нескольких факторов, одним из которых является фактор надежности авиационной техники. Обеспечение высокого качества конструкций, в том числе выполненных с использованием таких полимерных композиционных материалов

(ПКМ), как угле-, стекло-, органопластики, гибридные и другие высококомодульные ПКМ, относится к одной из основных задач авиастроения, т.к. надежность изделий ответственного назначения в значительной степени зависит от качества их изготовления.

Для подтверждения высокой надежности авиационной техники применяется технический контроль, т.е. проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям, при этом видное место занимает неразрушающий контроль – контроль объекта, при котором не нарушается его пригодность к применению. Дефектоскопический контроль позволяет провести контроль качества материала деталей и конструкций, а техническая диагностика позволяет определить техническое состояние объектов путем определения физико-механических свойств и состава ПКМ непосредственно в деталях и конструкциях без их разрушения.

Для определения прочностных характеристик углепластика в монолитных конструкциях выбран лазерно-акустический способ ультразвукового метода отражения, который может быть реализован с помощью прибора УДЛ-2М. Этот метод неразрушающего контроля основан на возбуждении импульсов упругих колебаний в объекте контроля с помощью луча лазера, приеме импульсов, прошедших контролируемый объект и отраженных от поверхности раздела двух сред, отличающихся характеристическими импедансами (от границ объекта контроля или неоднородностей), приеме отраженных импульсов и анализе параметров принятых сигналов.

В работе исследована связь механических характеристик материала (прочности при сдвиге и сжатии) и акустических характеристик (скорости и затухания УЗК при их распространении) материала образцов из углепластика марки ВКУ. Прочностные и акустические характеристики материала зависят от многих факторов, например, от соотношения основных компонентов пластика, от пористости материала и других, то есть от микро- и макроструктуры углепластика. Между механическими и акустическими характеристиками существует довольно тесная корреляционная связь, которая использована для неразрушающей оценки прочности углепластика.

В процессе выполнения работы установлены корреляционные связи основного параметра диагностики с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика марки ВКУ. Проведена компьютерная обработка экспериментальных данных с целью установления тесноты корреляционных связей параметра диагностики с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика и построены графики связи объединенного параметра, определенного с помощью прибора УДЛ-2М, с прочностью при сдвиге углепластика и прочностью при сжатии углепластика, определенных разрушающим методом (пористость материала менее 1 %).

Лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля по методикам, разработанным в ВИАМ, в настоящее время можно определить пористость, плотность и состав углепластиков, прочностные

характеристики монолитных деталей, степень полимеризации связующего в подформованных заготовках из углепластиков, предназначенных для изготовления интегральных конструкций, а также прочность при сдвиге соединения деталей интегральных конструкций. Разработанные технологические рекомендации и методические материалы находят применение при создании крупногабаритных конструкций типа консоли крыла, отсека фюзеляжа, силовых элементов, агрегатов управления и торможения самолета и т.п.

ИМИТАТОР ЛОПАТОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ПОВЕРКИ ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Данилин А.И., Чернявский А.Ж., Теряева О.В.

*СГАУ им. акад. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет), Самара, Россия*

Рассматривается вариант программно-аппаратного имитатора лопаточных импульсов для проверки и проведения поверочного контроля дискретно-фазовых преобразователей перемещений в составе систем определения деформационного состояния лопаток турбоагрегатов. Разработанный программно-аппаратный имитатор позволяет оперативно изменять имитируемые информационные параметры лопаточных венцов, форму выходных аналоговых сигналов и задавать необходимые случайные законы их изменения.

Анализ научно-технической литературы показывает, что среди разнообразных методов и средств контроля и диагностики деформационного состояния лопаток на эксплуатируемых турбоагрегатах, наиболее перспективным является бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), позволяющий определять индивидуальное деформационное состояние каждой лопатки рабочего колеса турбомашин [1]. Суть ДФМ заключается в измерении временных интервалов между импульсами корневого и периферийного дискретно-фазового преобразователей перемещений, их сопоставлением с геометрическим положением лопатки в определенные моменты времени и соответствующей интерпретацией полученных значений в области механических напряжений и деформаций.

В настоящее время известны несколько подобных систем, реализующих ДФМ – в т.ч. система контроля деформационного состояния лопаток турбомашин (СКДСЛ) разработки специалистов СГАУ [2]. При разработке, отладке, изготовлении и экспериментальных работах с использованием подобных систем необходима объективная методика проверки работоспособности и контроля параметров указанных систем.

Логичным явилось бы использование для проверки и поверки диагностических систем образцового лопаточного колеса с одной или несколькими лопатками, имеющими эталонные колебательные характеристики. Однако использование такого подхода наталкивается на трудность обеспечения необходимой точности изготовления элементов лопаточного колеса и невозможности оперативной смены параметров колебаний эталонных лопаток. В тоже время, применение генераторов сигналов промышленного производства для имитации сигнала периферийного преобразователя, как правило, невозможно, поскольку имитационный сигнал не может быть сформирован стандартными видами модуляции сигнала, кроме этого, требуется обеспечить необходимый статистический закон распределения его информационных параметров.

При вращении лопаточного колеса колеблющаяся лопатка проходит около периферийного датчика в различные моменты времени. В общем случае фаза прохождения лопатки является случайной, как из-за сложного характера колебаний лопатки, так и из-за некротности частот колебания лопатки и вращения колеса. Если принять в первом приближении, что лопатка колеблется по гармоническому закону со случайной начальной фазой, то плотность вероятности будет распределена согласно закону \arcsin [3].

Формирование последовательности с законом распределения \arcsin осуществляется с помощью метода обратной функции [4]. Для получения последовательности случайных отсчетов Y , соответствующих информационному смещению лопатки относительно ее среднего положения, с распределением вида \arcsin , необходимо сформировать случайную последовательность X с равномерным законом распределения и подвергнуть случайную последовательность X преобразованию согласно методу обратной функции.

В соответствии с изложенным авторами предложена схема программно-аппаратного имитатора информационных лопаточных импульсов на основе системы автоматизации математических расчетов MATLAB и микроконтроллера ADUC841 производства фирмы Analog Devices.

В программе для системы MATLAB задаются исходные параметры, описывающие моделируемую ступень турбоагрегата – частота вращения колеса, количество лопаток, амплитуды колебаний лопаток, вид формируемого импульса (модуль сигнала \cos , либо модуль сигнала \sin), производится формирование 3-х некоррелированных последовательностей случайных чисел с равномерным распределением, затем выполняется их преобразование к последовательностям с распределением вида \arcsin . После чего на основе полученных последовательностей производится вычисление временных интервалов для управления внутренними таймерами микроконтроллера. Полученные последовательности программируются во внутреннюю память микроконтроллера. Из-за конечного объема внутренней флэш-памяти микроконтроллера ADUC841, производится моделирование только

3-х колеблющихся лопаток, а длина псевдослучайных последовательностей по каждой лопатке ограничена значением 8500 элементов.

Значения амплитуды выходного сигнала имитатора выдаются на внутренний цифро-аналоговый преобразователь микроконтроллера с интервалом 1 мкс и после низкочастотной фильтрации сигнал подается на выход устройства. Использование синтезирующего фильтра 2-го порядка для формирования выходного сигнала позволяет получить хорошую форму сигнала, соответствующую, например, форме сигнала радиоволнового первичного преобразователя.

Выводы

Применение предложенного авторами имитатора информационных лопаточных импульсов позволяет осуществлять функциональную проверку и поверку систем контроля деформационных характеристик лопаток.

Возможность количественного задания параметров колебаний лопаток обеспечивает необходимую универсальность при использовании устройства со всеми известными системами.

Использование предложенного имитатора даст возможность выполнять функциональную проверку и поверку систем контроля деформационных характеристик лопаток турбоагрегатов без применения дорогостоящих стендов и экспериментальных турбомашин.

Литература

1. **Заблоцкий И.Е., Коростелев Ю.А., Шипов Р.А.** Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1977, 160 с.
2. **Патент РФ № 2177145**, МКИ G01N1/08. Сигнализатор предаварийных деформаций лопаток турбомашин // Данилин А.И., Чернявский А.Ж. (РФ); Опубликовано 20.12.2001, бюл. № 35.
3. **Тихонов В.И.** Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
4. **Прохоров С.А.** Математическое описание и моделирование случайных процессов. Самарский государственный аэрокосмический университет, 2001. 209 с.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Елин А.Ф.

ЗАО «Теккноу», Санкт-Петербург, Россия

Доклад посвящен вопросам наземного обслуживания воздушных судов с применением средств неразрушающего контроля и диагностики. Представляемые ЗАО «Теккноу» NDT-системы позволяют выполнять такие операции как: проверка герметичности пневматических и гидравлических систем, герметичность кабины без создания в ней избыточного давления, герметичность топливных баков (емкостей), состояние подшипников всех видов, работу пневматических и электрических переключателей, форсунок, насосов и т.п.

ВИХРЕТОКОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Сясько В.А., Чертов Д.Н., Соломенчук П.В.

ЗАО «Константа», С.-Петербург, Россия

В последние годы в авиакосмической технике существенно возросло применение конструкционных углепластиковых материалов, обладающих высокими прочностью и теплостойкостью, низкими плотностью и ползучестью.

Специфические особенности технологических процессов изготовления углепластиковых конструкций могут вызвать несоблюдение пропорций армирующего материала и связующего, отклонение толщины стенки, пористость и разрыв нитей. Сложные условия эксплуатации могут привести к межслоевым и внутренним объемным расслоениям и образованию трещин.

Выше сказанное определяет необходимость проведения комплексного контроля на всех этапах жизненного цикла углепластиковых конструкций. Представляет интерес использование вихретокового вида неразрушающего контроля, для чего был разработан прибор и комплект вихретоковых фазовых и частотных преобразователей для измерения электропроводности и толщины стенки изделий, выявления трещин и межслоевых расслоений, а также их глубины и площади. Рассмотрены принципы расчета и оптимизации параметров преобразователей, методики отстройки от влияния мешающих параметров, схемы и алгоритмы измерений, а также результаты эксплуатации приборов на авиакосмических предприятиях.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кажис Р., Мажейка Л., Райшутис Р.,
Жукаускас Е., Шлитерис Р., Владишаускас А.

*Институт ультразвука Каунасского технологического университета
Каунас, Литва*

В настоящее время композитные материалы начинают широко использоваться в различных областях и в первой очереди в авиационной и космической промышленности.

Цель работы – исследовать различные ультразвуковые бесконтактные (через воздушный зазор) методы неразрушающего контроля авиационных композитных материалов, наиболее оптимальные для определения дефектов типа расслоения.

Особенности бесконтактного контроля через воздушный зазор следующие:

- большие потери из-за поглощения ультразвука в воздухе и разницы акустических импедансов;
- возможности ультразвукового контроля конструкций односторонним доступом.

В работе были исследованы следующие методы ультразвукового контроля через воздушный зазор:

- метод прохождения с использованием объемных волн;
- метод одностороннего доступа с использованием A_0 моды волн Лэмба;
- метод одностороннего доступа с использованием A_0 моды волн Лэмба отраженных от дефекта.

Используя эти методы было исследовано обнаружение дефектов типа расслоения в армированных углепластиках и сотовых структурах. Также был проведен неразрушающий контроль через воздушный зазор панели истребителя RAF «Tornado» с полуавтоматическим сканером разработанным в Институте ультразвука.

В современных авиационных конструкциях также широко используются композитные CFRP стержни, которые склеиваются с помощью эпоксидной смолы в матрицу круглого или прямоугольного сечения. Практика показывает, что в этих стержнях встречаются дефекты типа расслоения, которые уменьшают прочность конструкций.

Нами был разработан ультразвуковой метод контроля качества CFRP стержней, основанный на бесконтактном возбуждении и приеме направленных волн в композитных стержнях.

Выводы

- Эксперименты показали, что с точки зрения уровня сигнала, наиболее эффективным является метод прохождения с использованием асимметричной A_0 моды волны Лэмба.
- Односторонний доступ позволяет определить дефекты типа расслоения в тонких образцах.
- Разработанные бесконтактные методы и аппаратура позволяет неразрушающий контроль многослойных авиационных материалов.

ПРИЕМНИКИ ВОЗДУШНЫХ ДАВЛЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В СЛОЖНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ

Скворцов Б.В., Блинов Д.И., Конюхов Г.А.

СГАУ им. акад. С.П. Королёва, Самара, Россия

Доклад посвящен проблеме повышения безопасности полетов с использованием приемников воздушного давления (ПВД) в конструкции летательного аппарата (ЛА). Воздушное давление является источником информации для различных систем воздушного судна, а также для пилота, поэтому правдивая информация о параметрах атмосферы критически важна для безопасного осуществления задач самолетовождения, особенно в сложных метеоусловиях, а также в условиях воздействия естественных или искусственных электромагнитных излучений. В связи с этим существует острая необходимость разработки методов и систем в двух направлениях:

– детектирование проявлений неблагоприятных состояний атмосферы на пути следования авиалайнера по первым признакам, индицирование параметров этих проявлений, выдача звуковой и световой сигнализации экипажу при превышении критических значений этих величин;

– индикация достоверной информации в случае попадания самолета в неблагоприятную воздушную среду, так как для принятия правильных решений экипаж нуждается в реальных данных, отражающих высоту полета, скорость и т.д.

Воздушное давление воспринимается приемниками воздушных давлений. Следовательно, совершенствование конструкции этих приемников напрямую влияет на точность и стабильность выдаваемых значений. Расширение функциональных возможностей ПВД с сохранением высокой точности измерения статического давления при наличии знакопеременных скоростей набегающих воздушных потоков позволяют пилоту определять не только статические и полные давления, но и направления воздушных потоков в зонах полета ЛА. Получаемая при этом информация от проточ-

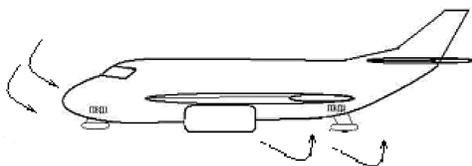


Рис. 1. Иллюстрация воздействий воздушных потоков на летательный аппарат

ных приемников [2] о динамике воздействия воздушных потоков на ЛА поможет летчикам принять наиболее рациональное (безопасное) решение о пути следования ЛА.

Факторы внешней среды оказывают на безопасность полетов самые различные воздействия в зависимости от типа самолета, режима полета, метеоусловий. Для каждого ЛА устанавливается совокупность расчетных значений характеристик внешних условий, которые могут изменяться во времени и в локальных зонах нахождения ЛА. Авиационные происшествия происходят в результате возникновения в полете неблагоприятных факторов, усложняющих ситуацию и приводящих, в конечном счете, к аварии или катастрофе [3]. Для определения, в каком атмосферном потоке находится ЛА, должна быть аппаратура, автономно анализирующая реальную ситуацию в любой момент времени. К сожалению, в настоящее время таких автономных средств пилоты практически не имеют. В этой связи было бы целесообразно использовать на борту ЛА приемник полного и статического давлений знакопеременных потоков [1]. Отличительной особенностью предложенного устройства является то, что в диффузорной части приемника симметрично первой трубке полного давления, установленной в конфузорной части приемника, размещается вторая трубка полного давления. Измеренные давления могут быть использованы в корректоре высоты, датчике абсолютного давления, высотомере, вариометре и в указателе воздушной скорости. Теоретические основы построения проточных приемников давления изложены в работе [4].

Чтобы повысить эффективность управления ЛА, с точки зрения увеличения безопасности полетов в сложных метеоусловиях целесообразно устанавливать проточные приемники воздушных давлений в носовой и хвостовой частях ЛА. На ряду с повышением точности измерения статического давления это даст возможность одновременно определять пульсацию воздушных потоков на корпусе ЛА, позволит летчику на ранней стадии определить вход ЛА в зону аномальных воздушных потоков и принять решение о направлении обхода. Для определения летчиком вхождения в опасную зону можно использовать метод сравнения показаний статического и полного давлений, снятых в носовой и хвостовой частях ЛА (рис. 1).

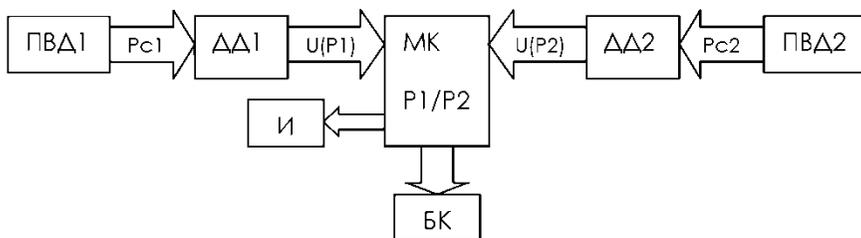


Рис. 2. Схема устройства определения вхождения ЛА в опасную метеозону

Функциональная схема устройства обработки сигналов разнесенных по корпусу приемников воздушных давлений приведена на рис. 2.

Приемник воздушного давления ПВД1, установленный в носовой части самолета, воспринимает статическое (полное) атмосферное давление, которое передается к электронному датчику давления ДД1, где преобразуется в электрический сигнал и поступает на вход микроконтроллера МК. На другой вход микроконтроллера через ДД2 поступает сигнал с ПВД2, расположенного в хвостовой части самолета. Микроконтроллер вычисляет отношение давлений, которое передается в бортовой компьютер БК и выводится пилоту на шкалу индикатора И.

Использование описанного устройства возможно не только на борту ЛА, но и на тренажерах, что позволит повысить качество подготовки летчиков профессиональным навыкам пилотирования в сложных метеоусловиях.

Список литературы

1. **Патент** на полезную модель Устройство для измерения полного и статического давления RU 81 801 U1 G01L 19/00 (2006.01) / Конюхов Г.А., Скворцов Б.В. / Опубликовано 27.03.2009. Бюл. № 9.
2. **Авторское** свидетельство Проточный приемник давлений SU 1543266 A1 G 01 L 19/00. /Конюхов Г.А., Кудрявцев Л.С., Никольский С.А./ Опубликовано 15.02.1990. Бюл. № 6.
3. **Володко А.М.** Эксплуатация самолетов и вертолетов в усложненных природных условиях. – М.: Транспорт, 1981 г. 158 с.
4. **Конюхов Г.А. Скворцов Б.А.** Прецизионные проточные приемники давлений для определения высоты и скорости летательных аппаратов. Авиакосмическое приборостроение № 7. 2006 г. С. 16–19.

СЕКЦИЯ № 8. ВИЗУАЛЬНЫЙ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ И ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Руководители секции: Матвеев В.И., Данилин Н.С.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Мишакин В.В.¹, Гончар А.В.¹, Гусев Ю.Б.²

¹ *Нижегородский филиал института машиноведения РАН,*
² *ОАО «ГАЗ», Нижний Новгород, Россия*

Доклад посвящен проблеме оценки остаточного ресурса элементов стальных конструкций и изделий неразрушающим оптическим методом контроля при усталостном нагружении.

В работе исследовалось влияние упругопластического циклического деформирования на процессы развития микропластических деформаций и формирование полос скольжения на примере низкоуглеродистой стали 15ЮТА для амплитуд нагружения в диапазоне 275...336 МПа. Микропластические деформации и характеристики полос скольжения (средняя длина, ширина и концентрация) определялись оптическим методом с помощью переносного оптического комплекса СПЕКТР МЕТ [1], позволяющего проводить металлографические исследования, как в лабораторных условиях, так и непосредственно на элементах конструкций. Получено, что на начальном этапе нагружения происходит наиболее интенсивное развитие микропластической деформации, а затем ее замедление и стабилизация на уровне 7 %.

Процесс стабилизации связан с появлением микропор, микротрещин в полосах скольжения, способствующих релаксации микронапряжений в очагах, подверженных микропластической деформации. Стабилизация микропластических деформаций происходила в диапазоне 30–50 тыс. циклов нагружения.

Получена высокая корреляционная связь, близкая к линейной, между концентрацией грубых полос скольжения и величиной микропластической деформации при различных значениях амплитуды нагружения (рис. 2,а).

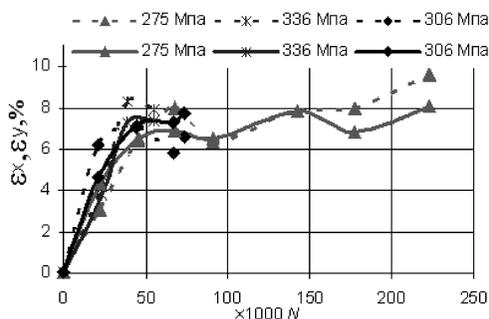


Рис. 1. Зависимость величины микропластической деформации от количества циклов нагружения

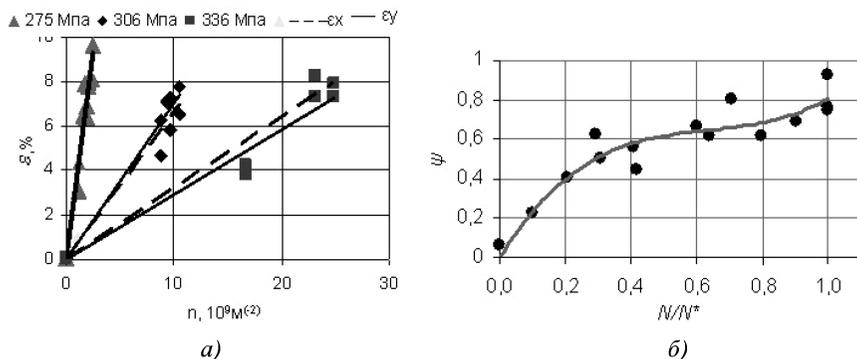


Рис. 2. Зависимости:

a – величины микропластических деформаций от концентрации грубых полос скольжения; *б* – поврежденности от относительного значения количества циклов нагружения

Связь поврежденности ψ , рассчитанной с помощью формулы Пальмгрена [2] ($\psi = N / N^*$), с концентрацией полос скольжения n и тангенсом угла наклона \bar{Q} кривых $\bar{\epsilon}(n)$, определялась в виде:

$$\psi = k_{0\psi} + k_{1\psi}\bar{Q} + k_{2\psi}n + k_{3\psi}n\bar{Q} + k_{4\psi}\bar{Q}^2 + k_{5\psi}n^2, \quad (1)$$

где $k_{i\psi}$ – коэффициенты.

Значение коэффициентов $k_{r\Psi}$, рассчитанных с помощью нелинейной множественной регрессии: $k_{0\Psi} = -0,203$, $k_{1\Psi} = 0,476$, $k_{2\Psi} = -0,026$, $k_{3\Psi} = 0,118$, $k_{4\Psi} = -0,132$, $k_{5\Psi} = 0,001$.

Наблюдается высокая корреляция (коэффициент корреляции более 0,9) между расчетными значениями Ψ и относительным количеством циклов нагружения N/N^* , полученных по данным механических испытаний. Наличие высокой корреляции дает возможность по данным оптических измерений, используя в качестве диагностических параметров интенсивность изменения микропластической деформации и концентрацию полос скольжения, оценить величину поврежденности материала. Корреляционное поле значений Ψ , рассчитанных с помощью выражения (1) и значений N/N^* , полученных по данным механических испытаний, приведены на рис. 2, б.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-00892 и грант 09-08-00827).

Литература

1. Митенков Ф.М., Мишакин В.В., Пичков С.Н., Ключников В.А., Данилова Н.В. Использование оптического и акустического методов контроля для оценки поврежденности сталей на ранних стадиях усталостного разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. № 12. С. 40 – 45.
2. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с., ил.

КОНТРОЛЬ ВЛАГОПРОЧНОСТИ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТЕКЛЕ

Бородин Ю.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия

Доклад посвящен вопросам совершенствования процесса определения влагопрочности оксидных покрытий без повреждений изделий из стекла с учетом имеющихся данных. Испытание влагопрочности оптических покрытий проводится по методике согласно ОСТ 3-1901-85 Выдержка стеклянных изделий, с нанесенными покрытиями в течение 10 суток в среде с относительной влажностью 95...98 % (без конденсации влаги) при темпе-

ратуре 40 °С сопровождается визуальным контролем нарушений поверхности. Контроль химической прочности производится для деталей с покрытиями, относящимися к 0, I, II группам механической прочности осуществляется погружением на 1 мин в децинормальный водный раствор CH_3COOH с $\text{pH} = 2,7$ (ГОСТ 61–75). В зависимости от нагружения деталей с покрытиями подвергаются контролю на прочность к щелочам путем обработки в водных растворах NaOH с $\text{pH} = 12,7$. В прочностные испытания покрытий также входит контроль на воздействие температуры до 450 °С в течение 2 ч со скоростью нагрева 30 °С/ч. Механическая прочность согласно этой методике определяется по числу оборотов на истирание резиновым наконечником с батином без образования на покрытии сквозной кольцевой царапины. Весь комплекс прочностных испытаний громоздок и проводится лишь на 3 % изделий с покрытиями.

Цель настоящей работы – усовершенствовать процесс определения влагопрочности оксидных покрытий без повреждений изделий из стекла с учетом имеющихся данных [1, 2].

Для исследования выбраны покрытия на основе оксидов Al, Sc, Ti, Zr и систем $\text{ZrO}_2\text{--Sc}_2\text{O}_3$ и $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$, полученных с разными скоростями электронно-лучевого испарения таблеток исходных составов. Обработка изделий (призмы из стекла К-8) с нанесенными покрытиями толщиной 0,2...0,8 мкм проводилась в расплавах $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ при температуре 150...180 °С в течение 5...20 мин. Эллипсометрические исследования материала покрытий до и после обработки проводились на эллипсометре ЛЭФ-3М ($\lambda = 0,63$ мкм.) с использованием модели изотропного покрытия на изотропном изделии. Характеристикой качества покрытий являлась относительная плотность, связанная с показателем преломления следующим образом [3]:

$$p = \frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 + 2} \cdot \frac{n_2^2 + 2}{n_2^2 - 1},$$

где n_1, n_2 – показатели преломления покрытия и стекла изделия.

Плотность покрытий фиксировалась по изменению оптической толщины. Из представленных на рис. 1 зависимостей $h_{\text{опт}}(t_{\text{обр}})$ и визуального контроля поверхности установлено, что следы травления наблюдались только на покрытиях, для которых $h_{\text{опт}}$ убывала со временем обработки. При низкой плотности материала покрытий и наличии включений образование гидроксильных групп сопровождается их конденсацией вокруг катионов и гидрированием оксида с выходом последнего в расплав. Это приводит к травлению покрытий, что визуально наблюдается. Способ определения влагостойкости оксидных оптических покрытий, который состоит в обработке стеклянных оптических изделий в безводной среде – расплаве бензойной кислоты при температуре от 150 до 180 °С в течение 5...20 мин с

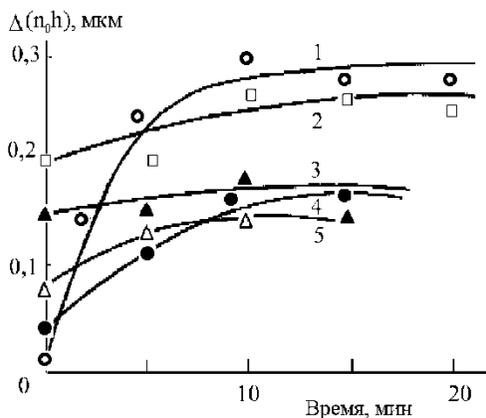


Рис. 1. Изменение оптической толщины от времени обработки в расплавах C_6H_5COOH при $150^\circ C$ покрытий на основе ZrO_2 с добавлением Sc_2O_3 (мол. %): 5 (1); 80 (2); 50 (3); 40 (4); 8 (5)

последующим контролем эллипсометрическим методом оптической толщины. По степени растравливания можно судить о качестве покрытий. С повышением $h_{\text{отт}}$ обеспечивается устойчивость покрытий к разрушению, что связано с увеличением концентрации протонов, поляризованных состояний и отсутствием гидратации. Неизменность оптических параметров покрытий после обработки в расплавах также можно связать с повышением их химической прочности. В покрытиях на основе оксидных систем и разном соотношении компонент такая обработка сопровождается увеличением показателя преломления или разрушением поверхности. В покрытиях на основе системы $ZrO_2 - Sc_2O_3$ при содержании Sc_2O_3 от 8 до 20 мол.% низкая химическая прочность соответствовала уменьшению их оптической толщины. Добавка к ZrO_2 до 13 мол. % Y_2O_3 способствует устойчивости покрытий к гидратации и разрушению. Проведенные исследования показывают, что разработан эффективный способ определения влагостойкости оксидных оптических покрытий, который состоит в обработке стеклянных оптических изделий в безводной среде — расплаве бензойной кислоты при температуре от 150 до $180^\circ C$ в течение $5 \dots 20$ мин с последующим контролем эллипсометрическим методом оптической толщины.

Частичная диссоциация молекул воды при выдержке покрытий во влажной атмосфере приводит к образованию ионов H^+ и OH^- . Последние, взаимодействуя с поверхностью, образуют слой, препятствующий поступлению протонов глубь покрытий. При использовании расплавов бензойной кислоты, являющейся хорошим источником протонов (без ионов OH^-) от-

существует эффект сдерживания внедрения протонов в контролируемое покрытие.

Таким образом, обработка оптических покрытий на изделиях из стекла в безводных расплавах бензойной кислоты приводит к растравливанию оксидов в областях с низкой плотностью и слабой сцепляемостью с несущей поверхностью. При отсутствии растравливания насыщение оксидов протонами сопровождается увеличением оптической толщины покрытий. Разработанный способ определения влагопрочности не вызывает негативных явлений в плотных с высокой адгезией покрытиях и может быть распространен на другие материалы.

Литература

1. **Holgkinson I.J., Jacobson M.R., Macleod H.A. et.al.** Water penetration fronts in thin films deposited at obliqueleod H.A. // *Thin Solid films*. 1986. V.138. №2. С.289-296.

2. **Бакланов М.Р., Васильева Л.Л., Дульцев Ф.Н. и др.** Пористая структура и травление слоев диоксида кремния // *Поверхность: Физ., химия, мех.* 1989. №3. С. 65-72.

3. **Бородин Ю.В., Гусельников М.Э., Сергеев А.Н.** Наноконпозиционные структуры в тонком слое. – Томск: Изд. ТПУ, 2007. 106 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ В РФ И СРЕДСТВ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ США

Сумкин П.С.

НУЦ «КАСКАД» при МГУПИ, Москва, Россия

Доклад посвящен сравнительному анализу средств применяемых при проведении визуального и измерительного контроля (ВИК) технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах в РФ и средств оптического контроля (ОК) применяемых для этих же целей в США.

Проведение ВИК в РФ регламентируется инструкцией по проведению контроля – РД-03-606-03, в которой описывается порядок проведения контроля, стадии контроля, типовые дефекты, а также средства и условия контроля. Геометрические размеры сварных соединений описываются в ГОСТах на сварку (например, ГОСТ 5264–80 – Ручная дуговая сварка. Соединения сварные.) и всевозможных ПБ, определяющих нормы допустимости дефектов, приведенных в РД-03-606-03 по объектам контроля. Прове-

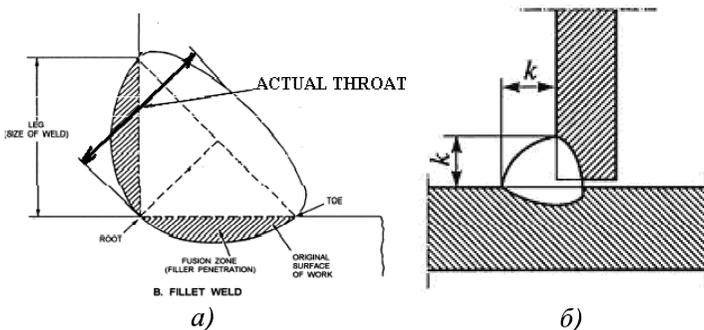


Рис. 1

дение ОК в США регламентируется рядом национальных стандартов. Например, стандарт на сталь – AWS-D1.1 – Structural Welding Code – Steel, сварочный код на сварку листовой стали AWS-D1.3 – Structural Welding Code-Sheet Steel и дополнительные спецификации по объектам контроля - AWS D15.1 – Railroad Welding Specification – Cars and Locomotives и т.д., определяющих нормы браковки дефектов. Однако подходы в определении измеряемых параметров сварных соединений в РФ и США имеют ряд различий, например, основным браковочным признаком угловых сварных соединений по ГОСТам на сварку в РФ является величина катетов (рис. 1, б), по стандартам США нормируется браковка расчетной высоты углового шва (рис. 2). Отличия в подходах определяют специфику конструкций мерного инструмента (рис. 2 и рис. 3).

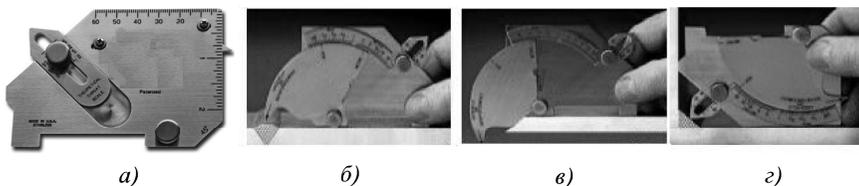


Рис. 2

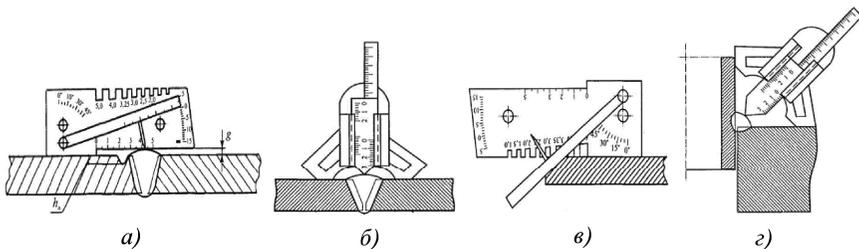


Рис. 3



Рис. 4

Также типовые наборы специалистов ОК в США отличаются по составу от наборов ВИК РФ, например, в составе набора ОК обязательно присутствует набор температурных маркеров (рис. 4).

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Теряева О.В., Данилин А.И., Чернявский А.Ж.

СГАУ им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен организации контроля профиля, кривизны и качества поверхностей различных элементов (лопатки, диски, валы и др.) турбоагрегатов и других ответственных изделий машиностроения, что позволяет расширять объективные знания о фактическом, реальном состоянии основных функциональных частей турбоагрегатов. Поэтому оказывается острой потребностью разработка экономичных и эффективных автоматизированных средств входного контроля профиля, кривизны и качества поверхностей деталей турбомашин. При сравнительном анализе методов измерения профиля и неровностей поверхности были отмечены негативные стороны существующих способов и устройств определения кривизны и формы поверхности лопаток турбомашин. Что указывает на необходимость отыскания новых возможностей и способов надежного и достоверного их контроля.

Разработаны дискретно-фазовые преобразователи угловых перемещений (ДФПП), реализующие оптические методы контроля кривизны профиля лопаток ГДТ. Их положительным качеством является отсутствие зависимости от степени чистоты исследуемой поверхности и как следствие переход от амплитудных измерений к временным. Для обоснования возможности реализации предлагаемых информационных преобразований и оценки количественных соотношений процессов влияющих и определяющих точность временных дискретно-фазовых преобразований, была разработана математическая модель оптоэлектронного ДФПП для определения профиля, кривизны и качества поверхностей элементов турбоагрегатов, основанная на определении угловых положений локальных зон контролируемых поверхностей. На основании законов геометрической оптики и использования аппарата аналитической геометрии и линейной алгебры был составлен алгоритм вычисления принятого фотоприемником светового потока. В соответствии с предложенным алгоритмом было разработано программное обеспечение, которое позволило автоматизировать расчеты рассмотренных процессов. На основании анализа экспериментальных графиков и графиков, полученных с помощью компьютерного моделирования, сделан вывод, что с увеличением угла наклона контролируемой поверхности выходной сигнал, а именно его информационная часть – временное положение середины импульса, смещается от исходного нулевого положения; длительность заднего фронта импульса фотоприемника меньше, чем длительность переднего фронта и с увеличением углового наклона контролируемой поверхности длительность заднего фронта информационного импульса уменьшается. Этот эффект хорошо согласуется с физикой работы устройства в том плане, что при сканировании контролируемой поверхности одинаковые во времени угловые приращения зондирующего (излученного) луча получают неодинаковые во времени угловые приращения отраженного луча, поэтому на участках поверхности приближенных, из-за ее наклона, к световоду-цилиндру крутизна формирования выходного сигнала фотоприемника увеличивается.

Разработан экспериментальный ДФПП для реализации предложенного способа определения углового положения или кривизны поверхности объектов. ДФПП, реализующий предлагаемый способ определения угловых положений поверхности объекта (рис. 1), содержит светопроводящую систему 1, состоящую из двух световодов, один концы которых объединены в общий приемно-передающий коллектор, источник 2 излучения, подключенный к одному из свободных концов светопроводящей системы 1, фотоприемник 3, вход которого соединен со вторым свободным концом светопроводящей системы, оптическую насадку 4, выполненную в виде цилиндра с радиусом R , световоды 5 и 6, выполненные, например, из световодных жгутов, стеклянных прутков или полых световодов, установленные в цилиндре 4 так, что их оси совпадают со взаимно перпендикулярными диа-

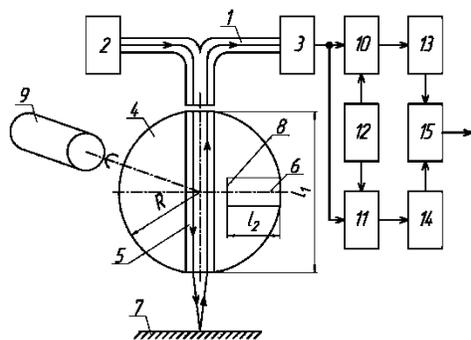


Рис. 1. Структурная схема ДФП

метрами цилиндра 4 и лежат в одной плоскости с осью приемно-передающего коллектора светопроводящей системы 1. На контролируемой поверхности выполнен зеркально-отражающий участок 7, а на выходном торце световода 6 закреплена (выполнена) зеркально-отражающая поверхность 8; электродвигатель 9, ось которого соединена с осью оптической насадки 4, компараторы 10 и 11, одни из входов которых подключены к выходу фотоприемника 3, формирователь 12 уровней компарирования, например $U_A = 0,7U_m$ и $U_B = 0,3U_m$, где U_m – амплитуда электрического импульса, соответствующего потоку принятому от образцовой зеркально-отражающей поверхности 8. Выходы формирователя 12 уровней компарирования соединены соответственно, со вторыми входами компараторов 10 и 11, блоки 13 и 14 выделения середин электрических импульсов, подключенных к выходам компараторов 10 и 11, блок 15 регистрации временных интервалов, входы которого соединены соответственно с выходами блоков 13 и 14, выход блока 15 регистрации временных интервалов является выходом устройства.

В процессе работы над конкретными реализациями, выяснилось, что представленный способ и ДФП, его реализующий обладают таким недостатком, как узкий диапазон измеряемых угловых положений контролируемой поверхности, обусловленный ограниченной длительностью одновременного существования излученного и отраженного световых потоков. Указанные недостатки определяются конструктивно-технологическими соотношениями приемно-передающего коллектора и световода оптической насадки. Поэтому была поставлена и решена задача расширения диапазона измеряемых угловых положений контролируемых поверхностей посредством увеличения времени совместного существования излученного и отраженного световых потоков. Для ее реализации в известный ДФП, содержащий источник излучения, фотоприемник, два компаратора с различными

уровнями компарирования, формирователь уровней компарирования, два блока выделения средин электрических импульсов, блок регистрации временных интервалов, электродвигатель, оптическую насадку, световод оптической насадки, метки опорного сигнала, дополнительно введены импульсный датчик опорного сигнала, установленный на неподвижном относительно оптической насадки основании, напротив траектории движения меток опорного сигнала, второй световод оптической насадки, установленный соосно с первым световодом в корпусе оптической насадки. Использование предлагаемого способа определения угловых положений поверхностей и ДФПП, расширяет диапазон измеряемых угловых положений контролируемых поверхностей известного способа и устройства его реализующего посредством увеличения времени совместного существования излученного и отраженного световых потоков. Так, например, появилась возможность определять угловые положения поверхностей, контролировать положение которых ранее было невозможно вследствие того, что отраженный от контролируемой поверхности световой поток не мог попасть в световодную систему во время одного периода вращения оптической насадки.

СЕКЦИЯ № 9. АВТОМАТИЗАЦИЯ НК

Руководители секции: Матюнин С.А., Федосенко Ю.К.

RESEARCH FOR DIGITAL AUTOMATIC TEST TECHNOLOGY OF HOLLOW AXLE IN MOTOR TRAIN UNIT

Wan Shengyun, Zhang Wenxian, Liu Shiyuan
(*CSR Qishuyan institute Co., Ltd. Changzhou,
Jiangsu province, 213011*)

Abstract: According to research the characteristic, enlarge, and displayed-waveform character in ultrasonic test for fatigue crack, it shows that the ultrasonic test progress for Hollow Axle used in China railway industry is fit to the requirements.

Key words: Hollow Axle, Ultrasonic testing, Non-destructive testing, technology

1. FORWARD

In recent years, motor cars at 200 Km/h and above are used widely in railway transport in China, and it satisfies the requirements of passengers greatly. And then, the safe and quality require is attended greatly in society, especially the key part: Axle. In order to depress the abrasion to the rail and reduce the weight, hollow axle is used widely all over the world. The axle is easy to form fatigue crack for Running in a high speed at the influence of various factor, and the fatigue crack is a great threat to the train safety.

To avoid fatal axle cutting in running, we must do non-destructive testing on new-made axle and recheck periodically when running in order to ensure safety.

At present, Ultrasonic test is used widely in China and abroad so as to search imperfection in the inner wall and outer surface by making use of definite-purpose hollow axle test system to inspect in the hollow.

2. CHARACTERISTIC AND EXTENSION ANALYSIS OF FATIGUE CRACK

2.1. Characteristic of fatigue crack

Refer to documentation and count to the axle NDT log before, most of fatigue cracks in solid axle are in transverse direction and mainly appear around mount position. They are found focus in the zone 10~35 mm apart from outer edge of mount position and 0~35 mm from inner edge of mount position. It is found crack planes are in 10°~25° inclination from normal line of axle side surface, meanwhile, outer crack extend and inner ones forth in law.

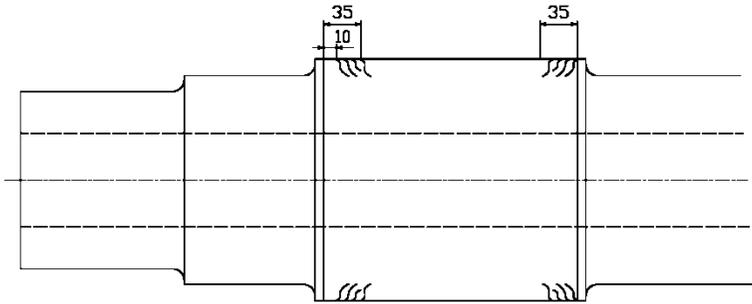


Fig. 1. Sketch map for fatigue crack zone

The geometrical shape and pressed force is similar between hollow axle and inner axle, so, we can consider the locations and directions of hollow axles is the same with solid axles.

2.2. EXTENSION ANALYSIS OF FATIGUE CRACK

When an axle is in service and it is pressed by an outside force less than rupture stress, several locations with macroscopic imperfections or uneven microscopic framework may form stress centralize, then local crack may appear. If the crack extend increasingly, the axle may be cut and cause a serious accidents.

A further analysis can be done according to linear fracture mechanics. Stress intensity in normal-state axle should be less than a special value, if it is more than the value with reasons, fatigue crack may occur and release stress, and then the stress intensity is less but a few should exists. The intensity of residual stress is correlative with crack depth.

According to the research result to hollow axle in shinkansen published by fatigue test institute in Railway Technical Research Institute of Japan, The location easiest to form fatigue crack is the mount place of wheel and gear set. The normal distribution of residual stress of nonmount locations and mount place is the same. According to measured residual stress on inboard gear set, a drawing was draw and showed as fig. 2.

A calculated result of crack stress intensity in normal distribution under gear set is showed in Fig. 3. The crack may extend if the max. stress intensity is more than the value on safety visual angle. As shown in fig. 4, the crack doesn't extend even its depth is up to 4mm at the condition of residual stress distribution. The max approved crack depth can be decided as a value that less than 4mm based on safety.

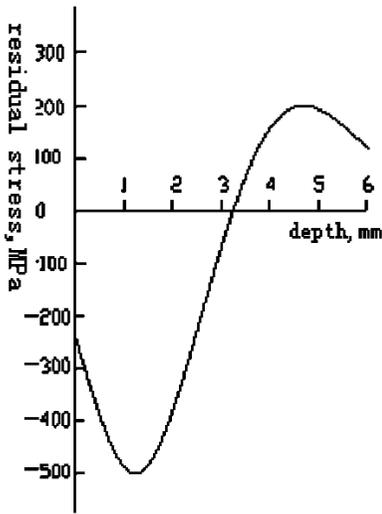


Fig. 2. Distribution of residual stress

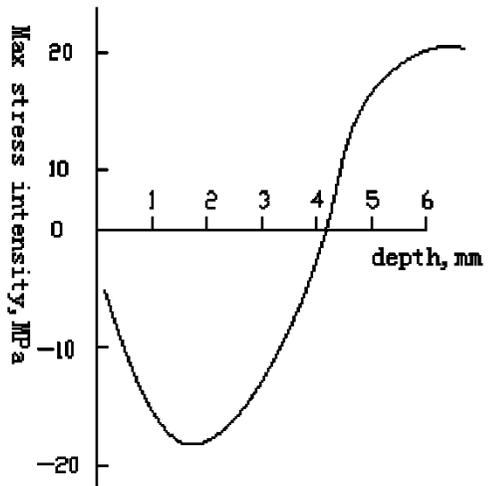


Fig. 3. Max crack stress intensity in mount location

Figure 4 shows stress state of crack in nonmount location according to normal distribution and logarithmic distribution. The crack won't extend at its 2 mm depth with the residual stress is distributed as logarithmic distribution. So, set the max approved crack depth in nonmount location to a value less than 2 mm can be sure for the safety.

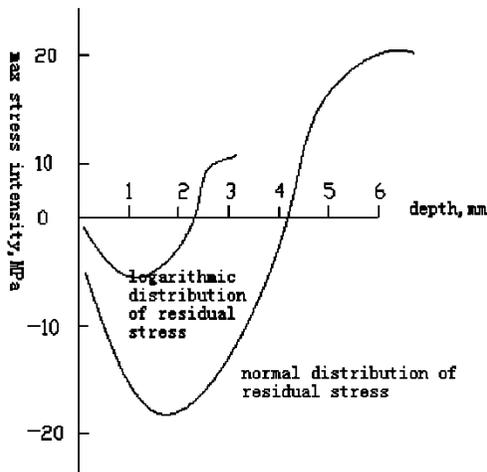


Fig. 4. Max crack stress intensity in nonmount location

3. WAVEFORM CHARACTERISTIC ANALYSIS ABOUT ULTRASONIC TESTING ON HOLLOW AXLE

As the analysis above, consult several documentations overseas the same time, and do many Non-destructive tests, it is considered to analyze the waveform characteristic of Ultrasonic test on hollow axle in order to get a better checkout rate.

When do Ultrasonic test on hollow axle, it should not only show the fatigue crack waveform but separate the waveform of bad mount contact and waveform of edge and corns. The different echo waveform has its rules.

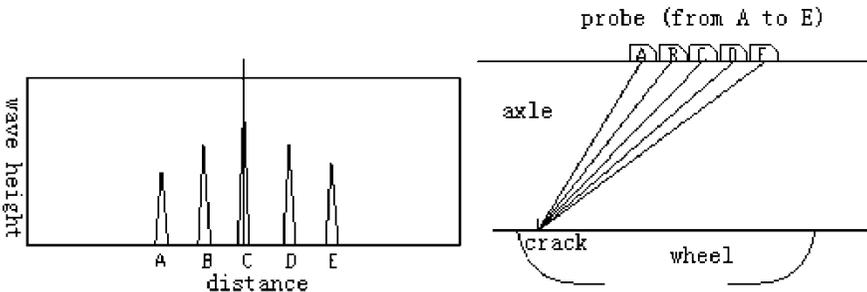
Waveform characteristic of fatigue crack in mount location is keen-edged, the wave crest is cragged. But the waveform of corrupt channel and solid inclusion is lower, wave foot is wider. When the probe moving, crack waveform has a length, as in rule, and the change is smooth. But the other imperfection waveform undulates greater, not in rule, the probe moves lightly and the wave may disappear.

It is the same location about wave from bad mount contact echo and fatigue crack echo. But the wave about bad contact is wider and not a keen-edged, contrast to the simplex, narrow, keen-edged wave about fatigue crack.

When the probe moves forward and backwards, the wave from bad contact shows many small waves, the waveform undulates, and the wave crests are lower. Although higher wave may form because of oil and impurity, its level position may not change. But the wave coming from fatigue crack is undulates in rule and the level position is changed in rule.

Wave from shoulder is stronger, and its waveform character is similar with wave from fatigue crack. Also, Its waveform undulates in rule and level position changed in rule when probe moves forwards and backwards. But if probe move circumferentially, its wave height may not change.

As shown in figure 5.



(4) Echo from fatigue crack

Fig. 5. Possible echo waveform from axle

4. ULTRASONIC TESTING PROCESS ON HOLLOW AXLE

The imperfections of hollow axle come from several reasons:

When forging, material imperfections in new-made hollow axle are drawing in longitudinal direction to form longitudinal capillary crack and inner sheet inclusions. When mounting wheel, brake wheel, gear, or bearing, longitudinal pull may form in outer surface. When in service, fatigue crack may form in stress centralized position because of alternating stress. If it is not detected in time, serious accident such as cut axle may occur. So, it should be sure to detect the imperfections above of the ultrasonic testing process on hollow axle.

4.1. Probe selection

A good contact between probe and interface must be in guarantee when do ultrasonic test. The probe surface must be grind the same curvature with hollow wall to ensure enough sound energy enter, and the interface of hollow axle is a round-arc with 30 mm ~100 mm center diameter

The refraction angle of probe should be moderate. If it is too large, the sound distance may be longer, and affect the sensitivity; if it is too small, the echo energy may be affect, so the crack detect probability may be depress, and affect the sensitivity. Consider state of fatigue crack and test results of different refraction angle in synthesize, 8 probes used in common. In test head, two 45°refraction angle placed in symmetry(detect circumferential and inner imperfection of axle), two 38°refraction angle placed in symmetry(detect circumferential and inner imperfection of axle)(The two type of probes can check crack in different directions omnidirectionally), two 50°refraction angle placed in symmetry(detect outer surface and inner longitudinal imperfection of axle), two 70°refraction angle placed in symmetry(detect inner surface longitudinal imperfection of axle), and it fit all type of axles with 30 ~ 110 mm inner diameter.

4.2. Frequency selection

The probe frequency should be right. If the frequency is too large, the attenuation is big even if the pointing angle is good and is sensitive to small imperfections. If the frequency is too little, the wave length is bigger and sensitivity to small imperfection is weaker. According to axle material and result analysis to NDT process, the selected frequency is 2 ~ 5 MHz.

4.3. Coupling

When testing, The 8 probes are packaging in test head by polymethyl methacrylate plastics. The probes will not be contact with parts, and a oil pellicle is formed. The test head can turn in helix without sluggish and it show a good coupling.

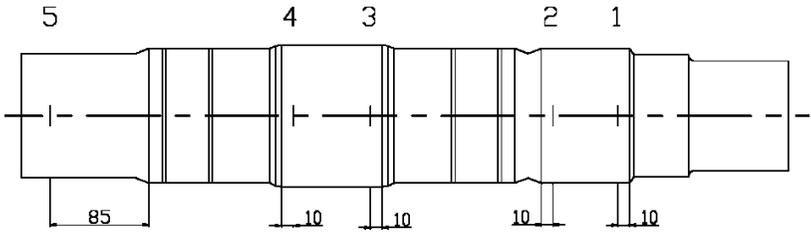


Fig. 6. Sketch map for reference block

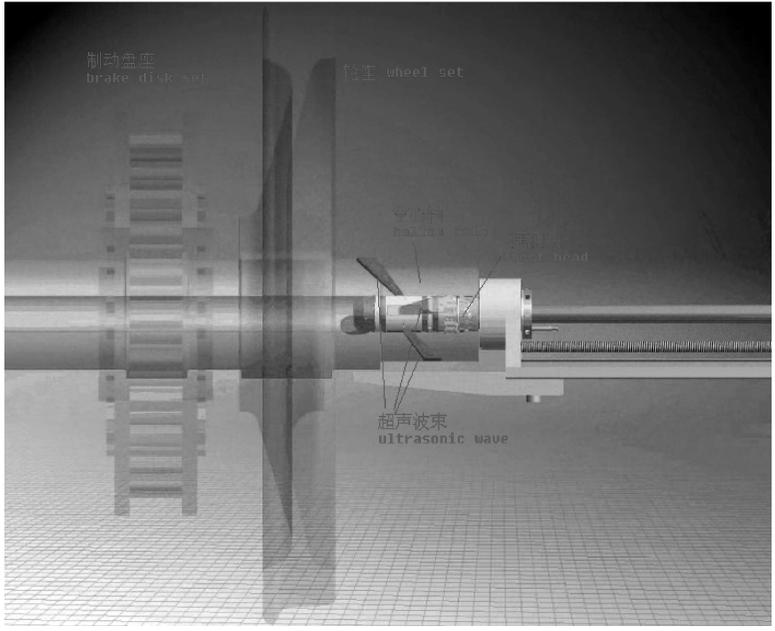


Fig. 7. Sketch map for automatic test of hollow axle

4.4. Sensitivity

When does Ultrasonic test to axle, the sensitivity should be demarcate to fit the requirement, and test block with man-made imperfection should be produced. Refer to the standard and related to realism: the fatigue crack is mainly in zone apart from mount location 10 ~ 35 mm, man-made imperfections are produced by electric spark in different positions. The imperfection is about 25 mm length, and the concrete position is shown in figure 6.

- 1) Produce 0,5 mm depth man-made imperfections in nonmount locations (5).
- 2) 1,0 mm depth man-made imperfection and 1,5 mm depth man-made imperfection are produced in wheel set locations that 15 mm from both edge (1, 2).
- 3) 1,0 mm depth man-made imperfection and 1,5 mm depth man-made imperfection are produced in gear set locations that 15 mm from both edge (3, 4).

Mount the wheel set and gear set onto the hollow axle with man-made imperfections, the same as normal hollow axle, in order to simulate the real surroundings, and decided the sensitivity via it.

4.5. Test method and speed

Set the probes onto a test head, and take the test head into the hollow, moving and testing in helix inside the range of 2200 mm. It is about 5 ~ 10 min for one axle. As shown in fig. 7.

4.6. Display method

To display the result clear and visually, there are B-scan and C-scan besides normal A-scan. Inspector can show the A-scan and C-scan the same time, and it is clear and visually, easy to analyze and evaluated, so as to ensure the accuracy and reliability.

5. Conclusions

According to the ultrasonic test method above, about 5,000 new-made and overhaul hollow axles in motor train unit were tested. Where there were 31 axles with the imperfections were over the permission, and 13 is inner material imperfections, 18 is fatigue cracks. There is no cut axle accident for several years for these axles. Practice proves that the ultrasonic test process for hollow axle is up to the requirements of the hollow axle, and it provide a important technique guarantee to the safety of motor train unit.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОПОМПАЖНОЙ ЗАЩИТЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Решетов А.А.¹, Пташков С.В.²

¹ ГОУ ВПО «Московский государственный университет
приборостроения и информатики», Москва, Россия

² ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»
Нижний Новгород, Россия

Введение. Работа посвящена разработке метода повышения эффективности системы противопомпажного регулирования и защиты газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

При параллельной работе нескольких групп неполнонапорных или полнонапорных нагнетателей необходимо следить за тем, чтобы каждой группой ГПА перекачивалось одинаковое количество природного газа. Изменение в одной из групп расхода в сторону уменьшения может привести к помпажу нагнетателя, если у него нет системы противопомпажного регулирования и/или противопомпажной защиты. При наличии сигнализатора помпажа, его срабатывание должно обязательно сопровождаться автоматическим открытием крана № 6 ГПА и появлением на агрегатной панели сигнала «Помпаж». Эксплуатационный персонал обязан выяснить причину возникновения такого режима и путем регулирования объемного расхода, изменением схемы работы или числа работающих в группе ГПА устранить вредное явление помпажа.

Помпаж центробежного нагнетателя ГПА – следствие его работы на систему с длинным газопроводом при высоких степенях сжатия и малых расходов газа в зоне неустойчивых режимов. Такое явление возможно в результате изменения режима работы газопровода, роста сопротивления на входе или выходе из нагнетателя, самопроизвольной перестановки кранов при работе ГПА, аварийной остановке одного из последовательно работающих нагнетателей. Помпаж сопровождается резкими колебаниями расхода и давления газа, развитием опасных крутильно-изгибных колебаний валопровода ГПА, увеличением вибрации ГПА и примыкающей к ГПА трубопроводной обвязки, характерным звуком в нагнетателе. Известно, что у современных центробежных нагнетателей и осевых компрессоров газотурбинных двигателей частота колебаний при вращающемся срыве, как правило, находится в пределах 30...80 Гц, а частоты помпажных колебаний – в диапазоне от 0,5 до 20 Гц и даже более. Работа в зоне помпажных режимов нагнетателя не допускается, поэтому границу помпажа (неустойчивых режимов работы) наносят на напорную характеристику компрессора. Если рост сопротивления на входе в нагнетатель вызван гидратообразованием в пылеуловителях или на защитной решетке нагнетателя, то его рекомендуется выводить на «кольцо». Этим достигается увеличение температуры газа в нагнетателе, работающем на «кольцо», и, как следствие, разрушение гидратов.

Существующие алгоритмы противопомпажного регулирования и защиты центробежного компрессора ГПА имеют недостатки, из-за которых защищенность от помпажа машины не может быть надежно обеспечена. Поэтому разработка информативных критериев для построения эффективного алгоритма противопомпажного регулирования и защиты центробежного компрессора является актуальной задачей.

Основные результаты.

Система противопомпажного регулирования и защиты центробежного компрессора ГПА с электроприводом может состоять из двух контуров:

– первый контур включает в себя сигнализатор перепада давления СПД-10/120, буферную емкость $V = 0,005 \text{ м}^3$, дроссельную шайбу диаметром 2 мм, агрегатный кран № 6;

– второй контур открывает агрегатный кран №6 при падении тока статора главного электрического двигателя (ГЭД) менее $0,3I_n$, где I_n – номинальный ток статора ГЭД.

Аналогичные системы разрабатываются и применяются для ГПА с газотурбинным и поршневым приводом.

Для повышения эффективности системы противопомпажного регулирования и защиты ГПА предложено применять расчетно-экспериментальный метод вибродиагностического контроля энергетического оборудования на основе показателей чувствительности узлов к возбуждающим колебаниям воздействиям [2].

В отличие от существующих методов вибродиагностического НК предлагаемый метод основан на применении расчетных спектральных «портретов» объекта диагностирования, существенно облегчающих прогнозирование зарождающихся дефектов по структуре изделия (в том числе контроль и анализ околопомпажного и/или помпажного режимов). Инерционные характеристики задаются в простейших случаях списками инерционных элементов, отражающих вращательные движения тел вращений. Линейные силы упругости описываются упругими элементами. Введенные таким образом элементы и твердые тела имеют в своем составе геометрическую (кинематическую) и физическую части. Первая включает переменные (координаты), описывающие обобщенные координаты и перемещения объектов механической модели, вторая отражает физические характеристики – инерционные и упругие свойства (определяемые по компьютерной программе).

Для вынесения заключения об отсутствии или наличии дефекта (помпажа), а также его развитии необходимо сравнить расчетную априорную информацию (расчетный спектральный «портрет», определяемый по компьютерной программе) с апостериорным спектральным «портретом» на основе виброакустического канала.

Обсуждение результатов.

Теория и практика эксплуатации энергомеханического оборудования газотранспортных систем показывают, что именно виброакустические сигналы крутильных колебаний валопроводов содержат сведения о зарождении и проявлении многих дефектов узлов энергомеханического оборудования (в том числе околопомпажных и/или помпажных режимов). Поэтому в целях повышения эффективности системы противопомпажного регулирования и защиты ГПА целесообразно применять информативные параметры крутильных колебаний валопровода энергомеханического оборудования путем его вибродиагностический контроля по расчетно-экспериментальному методу [1, 2].

Также необходимо штатное оснащение ГПА встроенными средствами измерения и анализа крутильных колебаний роторов (торсиографами, торсиометрами и другими средствами), а также аварийной защиты. Для оптимизации систем измерения параметров оборудования (устранения их избыточности) необходимо правильно располагать преобразователи крутильных колебаний валопровода вдоль его линии на основе применения расчетного спектрального портрета (энергетических соотношений на собственных частотах).

Уровень амплитуд вынужденных колебаний ГПА (отклик системы на зарождение помпажа) определяется энергетической чувствительностью к возбуждению (значением функций чувствительности), амплитудой помпажных пульсаций, уровнем демпфирования в системе и отстройкой ее собственных частот колебаний от частот возмущения.

Так, например, путем сопоставления расчетной и опытной информации по газоперекачивающим агрегатам с электроприводом типа ЭГПА2-12,5/76-1,5 мощностью 12 500 кВт при $n = 3\ 000$ об/мин были построены диагноз, прогноз и сигнал управления объектом (расчетные частоты свободных крутильных колебаний системы находятся в диапазоне от $f_1 = 23,3$ Гц до $f_{32} = 6455,2$ Гц).

Литература

1. **Неразрушающий контроль:** справ.: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003–2005.
2. **Решетов А.А.** Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов: учеб. пособие / А.А. Решетов, А.К. Аракелян; под ред. проф. А.К. Аракеяна. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. 470 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АКТИВНОМ ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Нестерук Д.А.

ГОУ ВПО НИ ТПУ, Томск, Россия

Преимуществом использования нейронных сетей в дефектоскопии является их способность учиться определению малых различий между идентифицируемыми классами объектов (дефектов) благодаря тренировке на соответствующим образом выбранных эталонных данных, которые получают экспериментально или теоретически. В тепловом контроле (ТК) с его зашумленными входными данными нейронные сети могут быть эффективным инструментом как тепловой дефектоскопии (в качестве обнаружителя дефектов), так и дефектометрии (в качестве классификатора дефектов).

Дефект на глубине 4 мм под дефектом на глубине 2,6 мм (не обнаруживается)

Обнаруживаются 5 дефектов на глубинах 1,3 и 2,6 мм

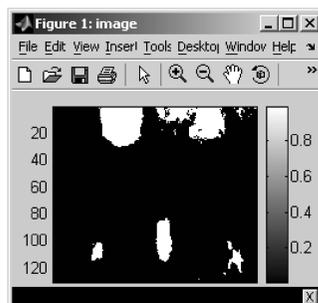
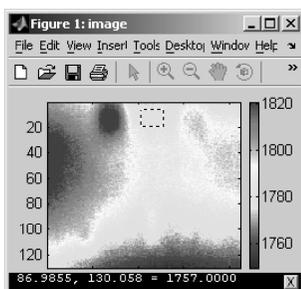


Рис. 1. Обнаружение дефектов в углепластиковом композите толщиной 4 мм (дефекты на глубинах 1,3; 2,6 и 4 мм) с помощью однослойного персептрона, имеющего 25 входов:

a – исходная термограмма в момент оптимальной регистрации (пунктиром показана бездефектная область, использованная для обучения нейронной сети);
б – бинарная карта дефектов после 40000 циклов адаптации

Нейронную сеть рассматривают как набор простых процессоров, соединенных многочисленными взаимными связями. Процессоры обладают внутренней памятью на простые операции, приобретенной в результате первоначального обучения. Обычно в структуре нейронных сетей выделяют отдельные слои, а параллельный характер сетей делает их пригодными для решения многопараметрических задач, в том числе, в качестве классификаторов образов.

Для обработки результатов ТК углепластикового композита с 6-ю фторопластовыми вставками на глубинах 1,3; 2,6 и 4 мм использовали однослойный персептрон с 25-ю входами, который был реализован с помощью математического редактора MatLab, содержащего комплекс функций для работы с нейронными сетями (Neural Network Toolbox) [1].

Число входов персептрона соответствовало числу изображений в выбранной тепловизионной последовательности, равному в конкретном случае 25. Выбор персептрона связан с необходимостью классификации векторов входа по 2-м классам – «дефект/не-дефект».

Полученные предварительные результаты применения вышеописанной простой нейронной сети для анализа результатов ТК позволяют сделать вывод, что нейронная сеть является простым инструментом получения бинарных карт дефектов, который позволил обнаружить 5 дефектов в исследованном стандартном образце при эффективном подавлении эффекта неравномерного нагрева. При этом не обнаруживался дефект на глубине

4 мм, расположенный частично под дефектом на глубине 2,6 мм; следует заметить, что этот дефект также не выявлялся ни одним из других использованных методов, в том числе, с помощью Фурье-анализа, полиномиальной аппроксимации и выделения главных компонент.

В настоящем исследовании разработана нейронная сеть с одним бинарным выходом, что обусловило ее применение для тепловой дефектоскопии. Также для осуществления тепловой дефектометрии и тепловой томографии создана нейронная сеть с произвольным числом выходов. Применение нейронных сетей наиболее эффективно при неразрушающем контроле однотипных изделий, что требует только однократного обучения сети. Задача снижения шумов процедуры перед обучением и распознаванием, а также оптимизации числа циклов обучения, требуют дальнейших исследований.

Список литературы

1. **Медведев В.С., Потемкин В.Г.** Нейронные сети. MATLAB 6 / Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 496 с.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ДОСТУПА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ МОНИТО- РИНГЕ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Никонов В.В., Севалкин А.А., Сумкин К.С., Абрамов А.А.

МГУПИ, Москва, Россия

Доклад посвящен механизму управления доступом к ресурсам системы при мониторинге сложных объектов. Предложены некоторые пути определения параметров доступа основанные на нечеткой и многозначной логиках.

Процесс управления автоматизированными системами (АСУ) связан с информационным обменом и включает наличие информационного потока направленного от объекта к субъекту, где под субъектом будем понимать управляющий элемент, а под объектом – управляемый.

При этом ключевым моментом является управление доступом к ним. Известно, что доступ – это взаимодействие между ресурсами системы или информационный обмен. В процессе доступа к информации реализуется ее копирование, модификация, уничтожение, инициализация и т.п.

В задачах автоматизированных систем управления различают санкционированный и несанкционированный доступ к информации. Когда доступ к ресурсам системы происходит с нарушением правил разграничения прав субъектов к объектам, его относят к несанкционированному (НСД).

Для того, чтобы установить какими правами субъект обладает на тот или иной объект необходимо определить его параметры. Для решения этой проблемы в настоящей статье рассматриваются метод разграничения доступа к объектам, основанный на методах нечеткой и многозначной логики.

Определим необходимые и достаточные параметры субъекта, ограничивающие доступ к объекту.

Для разграничения прав доступа (РПД) установлены параметры, при которых субъект получает доступ к объекту. Были введены и проранжированы параметры доступа.

Определение 1. *Параметры доступа (ПД)* – это лингвистические переменные, с помощью которых определяется доступ субъектов S_1, S_2, \dots, S_n к объектам O_1, O_2, \dots, O_m .

К таким параметрам относятся: степень важности обрабатываемой информации – *sec*, степень необходимости в конкретной информации для субъекта – *nei*, степень возможной опасности исходящей от каждого субъекта – *dng*.

Определение 2. *Существенные ПД* – это значения ПД, которые необходимы для получения доступа субъектов к объектам.

Теорема 1. *Для того, чтобы субъект имел доступ к объекту, достаточно, чтобы он обладал существенными ПД.*

Следствие. *Если все существенные ПД представить в виде определенных значений, то в случае когда объект попадает в некоторый промежуток $\Delta = r'_2 - r'_1$, где r'_2 и r'_1 – значения ближайших радиусов, тогда они определяются с помощью значения Δ .*

Для того, чтобы определить какими значениями ПД обладает субъект в работе были рассмотрены методы нечеткой гиперрезолюции, многозначной логики.

Был разработан метод нечеткой гиперрезолюции для определения существенных ПД. Для того, чтобы применить метод нечеткой гиперрезолюции для решаемой задачи, в работе множества значений ПД.

В качестве ограничения выступало следующее правило.

Правило 1. Если субъект может пользоваться очень важной информацией, то он также может пользоваться и информацией с более низким уровнем важности. Аналогично для степени необходимости или угрозы исходящей от субъекта. Тогда:

$$\text{sec} (S_i) \vee \text{nei} (S_i) \vee \text{dng} (S_i) \vee \text{ur_d} (S_i), \quad (1)$$

где (S_i) – субъект, а ur_d – уровень выполнения принимаемого решения.

При решении исходной задачи следует задать некоторую нижнюю границу степени истинности, которая будет показывать – какое значение должно соответствовать уровню выполнения принимаемого решения.

Пусть имеет место высказывание

$P =$ «Информация имеет третий уровень важности» со степенью истинности 0,95.

Введем следующие обозначения $\mu'(P)$ – степень истинности высказывания P , $cd(P)$ – степень достоверности этого высказывания.

Пусть степень противоречивости $P \wedge \neg P$ есть $\zeta(P) \in [0, 1]$, которая имеет вид:

$$\zeta(P) = |\mu(P) - \mu(\neg P)| \quad (2)$$

Доказано, что значение достоверности резольвент зависит от исходных значений степеней истинности высказываний.

Таким образом, был разработан метод определения существенных ПД на основе нечеткой гиперрезолюции.

Был разработан метод определения существенных ПД на основе многозначной логики. Раздел посвящен построению функциональных матричных блоков, удобных для моделирования РПД по ПД.

Пусть X'_i – независимое многозначная переменная, которая имеет вид матрицы переменного размера от 0 до $(n_i - 1)$, где $i = \{0, 1, \dots, N\}$, N – количество значений ПД.

Пусть существует базовая матрица n_i , которая состоит из значений ПД (числовых значений $[0, n_i - 1]$, $i = [0, N]$). По вертикали в матрице будут располагаться числа от 0 до $(n_i - 1)$, повторив столбцы n_i раз. На основе полученной базовой матрицы построены $(n_i - 1)$ ортогональных латинских квадрата (ОЛК).

Пусть существует числа W_i, w_i – характеристики базовой матрицы и ОЛК.

В каждом ОЛК введены координаты абцисс X'_i и ординат Z'_i .

Пусть $L(W_i, w_i, X'_i)$ – «латинское преобразование» и $L(W_i, w_i, X'_i \approx Z_j)$. Тогда, приняв $Z_j = NX_i$, выражение для «одноканальной» инверсии многозначной логики имеет вид:

$$NX_i = L(W_i, w_i, X'_i) \quad (3)$$

Перемножая базовую матрицу и построенные ОЛК, находится результирующая матрица. Элементы результирующей матрицы дают рекомендации, не выше каких значений ПД должен обладать объект, к которому получает доступ субъект.

Определено максимальное количество значений ПД, при котором скорость работы метода удовлетворяет требованиям скорости функционирования ЛВС. Количество значений не должно превышать 18.

Поэтому при количестве значений ПД больше 18 целесообразно применять комбинированный метод многозначной логики и нечеткой гиперрезолюции, который заключается в следующем: ранжируются общие ПД, такие как: *sec*, *nei*, *dng* и применяется метод многозначной логики, уменьшая количество общих переменных. Для оставшихся ПД применяется метод нечеткой гиперрезолюции.

В работе разработаны модели по определению не ниже каких характеристик должен обладать субъект, для того чтобы получить доступ к объекту.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СИНТЕЗА СТИРОЛ-АКРИЛОВОЙ ДИСПЕРСИИ С ДИАГНОСТИКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Соболева Е.Г.

*Дзержинский политехнический институт (филиал)
Нижегородского государственного технического
университета им. Р.Е. Алексеева, Дзержинск, Россия*

В докладе рассматривается система управления процессом синтеза стирол-акриловой дисперсии с диагностикой технологических параметров.

Процесс получения стирол-акриловой дисперсии основан на методе эмульсионной сополимеризации стирола, бутилакрилата, метакриловой кислоты и акриламида в присутствии инициатора персульфата аммония (ПСА).

Синтез дисперсии производится в реакторе Р-306. После загрузки в реактор синтеза обессоленной воды и достижения устойчивой температуры 78...82 °С, в него загружаются затравочное количество предварительной эмульсии мономеров (ПЭМ) и первая порция раствора ПСА, при этом возможен скачок температуры на 2...3 °С, что свидетельствует о начале реакции полимеризации. После стабилизации температуры начинают непрерывную дозировку ПЭМ и порционную загрузку ПСА. По окончании дози-

ровки ПЭМ содержимое реактора выдерживается при температуре 78...82 °С, и загружается 12-ая порция инициатора. После загрузки последней порции ПСА производится выдержка содержимого реактора в течение 40...60 мин. при температуре 78...82 °С. Затем в реактор одновременно загружаются растворы персульфата натрия и эмульсии третбутила гидропероксида, производится выдержка и затем содержимое реактора охлаждается до температуры 40 °С. По завершению процесса отбирается проба для определения массовой доли основного вещества (сухого остатка), остаточного мономера и рН полученной дисперсии.

Реакция синтеза стирол-акриловой дисперсии сопровождается выделением тепла и протекает по сложным кинетическим законам, поэтому к процессу предъявляются особые требования по технологическому и аппаратному оформлению. Кроме того на производимый продукт на предприятии существуют свои технические условия, в которых указываются допустимые пределы показателей качества. Их довольно много, но основными показателями являются массовая доля основного вещества (сухого остатка), остаточного мономера ($< 0,1$ масс.%) и рН полученной дисперсии (7–9). Исходя из вышеизложенного, к системе автоматического управления предъявляются повышенные требования:

- точность поддержания технологических параметров, с целью повышения качества выхода целевых продуктов и сокращения затрат сырья и энергоресурсов (важно обеспечить правильный температурный режим процесса синтеза, а также стабилизацию расходов предварительной эмульсии мономеров и персульфата аммония);

- удобство представления информации для операторов с целью повышения оперативности вмешательства в технологический процесс и расширения возможности представления технологической информации;

- реализация противоаварийной защиты технологического процесса и оборудования. Контроль и управление технологическим процессом предполагается осуществить трёх уровневой системой управления, включающей:

1. Датчики и исполнительные механизмы.
2. Дублированный микропроцессорный контроллер SIMATIC S7-400 фирмы SIEMENS (с использованием программного пакета Simatic Step7).
3. Пульт управления на базе рабочих станций фирмы SIEMENS промышленного исполнения (с применением SCADA-системы WinCC 7).

Работающие совместно программная и техническая составляющие позволяют организовать непрерывный контроль за технологическим процессом со стороны операторов, обслуживающего персонала. А на базе средств микропроцессорной техники становится возможным создание адаптивного управления с использованием математической модели процесса полимеризации, компенсирующего возмущающие воздействия.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЕФЕКТΟΣКОПИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ: ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ

Слесарев Д.А.
ИНТРОН ПЛЮС, Москва, Россия

Регулярное дефектоскопическое обследование оборудования является одним из важнейших механизмов обеспечения промышленной безопасности и одновременно обеспечивают оптимальную экономическую эффективность использования оборудования. Обследования проводятся в течение всего жизненного цикла оборудования. Для вынесения правильного заключения о техническом состоянии обследуемого объекта зачастую необходимо учитывать результаты всех предыдущих обследований и реальные условия его эксплуатации. Для повышения достоверности оценки состояния оборудования и снижения затрат на проведение экспертизы состояния объекта необходимо использовать специализированные информационные системы (ИС). При создании таких систем следует учитывать ряд требований, которым посвящен данный доклад.

Построение ИС дефектоскопического обследования, как и построение других информационных систем, основывается на описании соответствующего бизнес-процесса. При подготовке такого описания удобно использовать методологию функционального моделирования IDEF¹ [1]. В стандартном дефектоскопическом обследовании можно выделить четыре основных этапа: планирование контроля, проведение контроля, анализ дефектограмм и результатов контроля, подготовка заключения. При этом в качестве входных данных выступает договор на обследование объекта и эксплуатационная документация, а в качестве выходных – Заключение о техническом состоянии и Отчет о дефектоскопическом обследовании. Структура бизнес-процесса и содержание отдельных его этапов формируют требования к структурам данных ИС и ее архитектуре. При проектировании структуры данных следует также учитывать современные стандарты обмена и хранения данных, установившиеся в последнее время с неразрушающим контролем [2].

Основным информативным элементом входных данных является записанная на объекте дефектограмма и связанный с ней ряд других элементов данных, относящихся к использованному оборудованию (его настройки и пр.), к условиям контроля и к объекту контроля, эти данные представляют наибольшую ценность и поэтому сохраняются в неизменном

¹ IDEF0 – методология функционального моделирования; IDEF1 – методология моделирования информационных потоков

виде при обеспечении возможности их экспорта/импорта в другие системы обработки. Следует учитывать, именно информация об условиях контроля позволяют оператору в дальнейшем найти необходимую дефектограмму и ее правильно интерпретировать. В результате обработки формируется таблица дефектов и особенностей, используемая при подготовке заключения. При этом список дефектов связан с конкретной методикой контроля, которая задает классификацию дефектов (допустимые дефекты, критические дефекты) и классификацию конструктивных особенностей объекта контроля. В процессе анализа данных дефектограммы могут подвергаться различным операциям обработки (фильтрация, отсечка шума, коррекция координат и пр.), информация об этих операциях должна также сохраняться в ИС, но не должна искажать исходные измерительные данные.

Как следует из описания бизнес-процесса, выделяются четыре этапа, причем выполнение отдельных этапов может быть разделено во времени и в пространстве. В частности, этап планирования контроля, как правило, отделен от этапа проведения контроля. Контроль выполняется на объекте («в поле») и с применением дефектоскопического оборудования. Проведение контроля также отделено от этапов анализа результатов и подготовки заключения, причем последние два этапа часто выполняются другими специалистами. Соответственно и в рамках ИС имеет смысл выделить три отдельных приложения со своими специфическими задачами. Такое разделение позволяет снизить сложность отдельных приложений и повысить их надежность. Дополнительным аргументом в пользу разбиения на отдельные приложения выступает несинхронное изменение требований к отдельным этапам бизнес-процесса, в частности, расширение числа объектов контроля, изменение нормативных документов, изменение приборного парка компании. Совместную работу отдельных приложений обеспечивает общий интерфейс, реализованный в виде унифицированных и единых для всех приложений модулей, общая база данных и слой доступа к этой базе данных.

Литература

1. **Вендров А.М.** Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 544 с.
2. **Howard P., Arrowood L., Jobst M., Hansen J.** A Standard Practice for Digital NDT Data Exchange and Storage – Materials Evaluation, 2011. № 3. 319 с.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РЕКТИФИКАЦИЕЙ ЭТАНОЛАМИНОВ С ДИАГНОСТИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

Песков Н.П.

*Дзержинский политехнический институт
(филиал Нижегородского государственного технического
университета им. Р.Е. Алексева), Дзержинск, Россия*

В докладе рассматривается система управления непрерывной ректификацией при производстве этаноламинов с диагностическим контролем параметров процесса.

Этаноламины получают путем насыщения концентрированного раствора аммиака окисью этилена и последующим фракционированием полученной смеси методом ректификации. Автоматизация процесса ректификации представляет собой сложную инженерную задачу вследствие большого числа регулируемых параметров, их взаимной связи, сложной и недостаточно изученной динамики процесса. К тому же ректификационная колонна – объект управления со значительной инерционностью и временем запаздывания по каналам управления.

Сегодня значительно расширились возможности автоматизации, контроля и регулирования процесса ректификации. Использование микропроцессорных контроллеров как центральных управляющих органов позволяет учесть более широкий спектр технологических требований и повысить надежность поддержания оптимального технологического режима.

Разрабатываемая система управления предназначена для:

- автоматической стабилизации режимных параметров процесса в пределах норм, установленных технологическим регламентом (важно обеспечить стабилизацию температуры и уровня в кубе ректификационной колонны и стабилизацию расхода дистиллята из колонны);
- обеспечения необходимой точности управления, позволяющей поддерживать в установившемся режиме регламентированное качество целевого продукта;
- оперативного контроля технологических параметров, определяющих безопасность и эффективность технологического процесса;
- противоаварийной защиты и сигнализации;
- регистрации технологической информации.

Контроль и управление технологическим процессом предполагается осуществить с помощью программно-технических средств на базе дублированного микропроцессорного контроллера SIMATIC S7-400-H фирмы SIEMENS, пульта управления на базе трех рабочих и одной инженерной станции фирмы SIEMENS в промышленном исполнении, датчиков аналоговых и дискретных сигналов, исполнительных механизмов и частично местных приборов контроля и кнопок управления. Для повышения надеж-

ности функционирования системы автоматического управления и исключения простоев производства, связанных с большими потерями материальных и денежных средств выбирается резервированная система автоматизации. S7-400H состоит из двух идентичных подсистем, работающих по принципу «ведущий-ведомый». Обе подсистемы связаны оптическими кабелями синхронизации и выполняют одну и ту же программу. Управление процессом осуществляет ведущая подсистема. В случае отказа функции управления безударно переводятся на ведомую подсистему.

В производстве обращается взрывоопасная смесь аммиака. Для контроля утечки аммиака используется сигнализатор СА-2. Предназначен для непрерывного автоматического контроля и выдачи сигнализации о превышении установленных значений массовой концентрации аммиака (NH₃) в воздухе рабочей зоны. Принцип работы – электрохимический.

На базе средств микропроцессорной техники представляется возможным создание управления по возмущению с использованием математической модели ректификационной колонны для предвидения величины управляющего воздействия, полностью компенсирующей возмущающие воздействия. Показателями эффективности процесса являются составы получаемых целевых продуктов.

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВА PROAGENT ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО- ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА SIMATIC

Липин И.А.

*Дзержинский политехнический институт
(филиал Нижегородского государственного технического
университета им. Р.Е. Алексеева), Дзержинск, Россия*

Общие тенденции интенсификации современных производств направлены на повышение качества готовой продукции, снижение энергоемкости и повышение производительности установок. В основе большинства технологических процессов лежат процессы массопередачи, в том числе и экстракция. Как правило, они являются основой, неким базисом, для технологии производства готового продукта.

От правильного подхода к управлению аппаратом (экстрактором), адекватности его модели и алгоритмов управления, а также насколько грамотно, достоверно осуществляется прием, обработка и представление информации существенно зависит как технико-экономические показатели качества проведения процесса, так и удобство на стадии эксплуатации и сопровождения системы управления.

Система управления представлена централизованно и имеет классическую трехуровневую структуру:

- 1-й уровень – датчики и исполнительные механизмы;

- 2-й уровень – программируемый логический контроллер и барьеры искрозащиты;

- 3-й уровень – рабочая станция оператора (АРМ оператора).

Заложенные в проект принципы и решения позволяют легко вводить дополнительные датчики и исполнительные механизмы, адаптируя систему под требования конкретного заказчика и специфику его производства.

Средний уровень было предложено реализовать на основе производительного резервированного микропроцессорного контроллера SIEMENS Simatic S7-414H. Программная составляющая была написана с использованием пакета Simatic Step7 на языке LAD релейно-контактной логики полностью соответствующем международному стандарту МЭК 61131-3.

Рабочее пространство оператора (верхний уровень системы управления) создан на основе отказоустойчивых компьютеров промышленного исполнения Simatic Rack IPC847C и SCADA-системы WinCC 7. Работающие в комплексе, эти программная и техническая составляющие, позволяют организовать непрерывный контроль за технологическим процессом со стороны обслуживающего персонала и операторов.

Для эффективной работы в условиях непрерывного производства необходимо использовать современные диагностические средства. Для решения этой задачи в состав верхнего уровня был введен программный пакет ProAgent, предлагающий интеллектуальную и эргономичную диагностику программно-технических средств, входящих в состав комплекса SIMATIC.

Особенности:

- является составной частью концепции полностью интегрированной автоматизации (Totally Integrated Automation): повышает производительность, минимизирует затраты на инжиниринг, снижает затраты жизненного цикла;

- обеспечивает оптимальную поддержку персонала установки/предприятия при обнаружении и устранении неисправностей, повышает надежность предприятия, снижает время простоев;

- не требуется настройка для функций диагностики;

- от пользователя не требуется никаких специальных знаний, так как ему предоставляется исчерпывающее описание причин возникновения неисправности.

При возникновении ошибки процесса SIMATIC ProAgent предоставляет информацию о местонахождении и причинах сбоя и помогает в устранении неисправности.

ProAgent предлагает решение, специализированное для SIMATIC S7-300, S7-400 и WinAC. Он может использоваться в сочетании со средствами разработки Siemens.

Система успешно прошла апробацию, пусконаладочные работы и введена в эксплуатацию на предприятии ОАО «Оргхим» г. Урень. Во время пусковых работ проводилось обучение персонала.

Система позволила в плановом порядке получать целевой продукт заданного качества и сократить потребление ресурсов (вода, пар, хладагент) на 10...15 %, а также добиться экономии сырьевой базы за счет использования технологий моделирования и введения интеллектуальных алгоритмов управления.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИВИНИЛФОРМАЛЬЭТИЛАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА SIMATIC

Рябкова Т.А.,

*Дзержинский политехнический институт
(филиал Нижегородского государственного технического
университета им. Р.Е. Алексеева), Дзержинск, Россия*

Процесс получения поливинилформальэтилалей состоит из следующих технологических стадий: подготовка сырья; приготовление водного раствора поливинилового спирта; синтез поливинилформальэтилалей; промывка; стабилизация; сушка и рассев продукта.

Основной стадией является стадия синтеза, которую рассмотрим подробнее. Синтез поливинилформальэтилаля осуществляется в реакторе периодического действия, оборудованном импеллерной мешалкой, погружным фильтром, волнорезом, пробоотборником, рубашкой и теплообменником-конденсатором. В зависимости от необходимого температурного режима в рубашку реактора подается теплоноситель от «горячего» или «холодного» контура. Сначала в реактор синтеза подается охлажденный раствор поливинилового спирта до 69 °С, при работающей мешалке загружается требуемое количество соляной кислоты. Затем через 15...20 минут отбирается проба раствора на содержание соляной кислоты и при необходимости делается корректировка загрузки. Далее при интенсивном перемешивании (скорость вращения вала мешалки должна составлять ~200 об/мин) сливают требуемое количество формалина. Окончание слива формалина является началом 1-й фазы ацеталирования. Далее реакционная масса выдерживается при температуре 69 °С в течение 3 часов.

По окончании выдержки реакционная масса при перемешивании быстро охлаждается до 40 °С и плавно до 4 °С с постоянной скоростью охлаждения. После охлаждения, в реактор синтеза при работающей мешалке загружается требуемое количество ацетальдегида. Окончание загрузки ацетальдегида является началом 2-й фазы ацеталирования. Далее проводится ступенчатый подъем температуры реакционной массы.

По окончании ацеталирования водная суспензия поливинилформальэтилаля охлаждается до 20...25 °С.

Этот процесс является периодическим, следовательно, стоит задача программно-логического управления и стабилизации параметров конечных продуктов каждой стадии.

Система управления имеет классическую трехуровневую структуру: первый уровень - датчики и исполнительные механизмы; второй уровень - программируемый логический контроллер и барьеры искрозащиты; третий уровень - рабочая станция оператора.

Заложенные в проект принципы и решения позволяют легко вводить дополнительные датчики и исполнительные механизмы, адаптируя систему под требования конкретного заказчика и специфику его производства.

Средний уровень было предложено реализовать на основе производительного резервированного микропроцессорного контроллера SIEMENS Simatic S7-414H. Программная составляющая была написана с использованием пакета Simatic Step7 на языке LAD релейно-контактной логики полностью соответствующем международному стандарту МЭК 61131-3.

Рабочее пространство оператора (верхний уровень системы управления) создан на основе отказоустойчивых компьютеров промышленного исполнения Simatic Rack IPC847C и SCADA-системы WinCC 7. Работающие в комплексе, эти программная и техническая составляющие, позволяют организовать непрерывный контроль за технологическим процессом со стороны обслуживающего персонала и операторов.

Для эффективной работы в условиях непрерывного производства необходимо использовать современные диагностические средства. Для решения этой задачи в состав верхнего уровня был введен программный пакет ProAgent, предлагающий интеллектуальную и эргономичную диагностику программно-технических средств, входящих в состав комплекса SIMATIC.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АСТРА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

Тарабрин В.Ф., Зверев А.В.

ЗАО «Фирма ТВЕМА», Москва, Россия

Аппаратно-программный комплекс (АПК) **АСТРА** предназначен для автоматического распознавания типа или группы дефектов в рельсах, паспортизации объектов рельсового хозяйства с формированием пакета результатов мониторинга методами неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) рельсов и элементов стрелочных переводов в условиях эксплуатации. Комплекс является звеном в цепи между системами записи результатов мобильных и съемных средств НК и мониторинга комплексной автоматизированной системой комбинаторного анализа данных КАСКАД.

Информация АПК АСТРА входит в пакет для системы мониторинга КАСКАД в виде протоколов найденных программой значимых мест и выданных экспертом отметок, непрописавшихся болтовых отверстий, пропа-

даний донного сигнала, участков с нарушением акустического контакта, измеренных стыковых зазоров, данных для синхронизации проездов (GPS, характерные точки и объекты), мест с нарушением технологии контроля (настройки каналов, скоростной режим, работа ручными ПЭП операторами дефектоскопов и т.д.) и др.

Вся информация из АПК АСТРА экспортируется в систему КАСКАД, в которой заложен принцип комплексного подхода к анализу и мониторингу множества параметров объектов инфраструктуры, в данном случае параметра РЕЛЬСЫ. Система Каскад по параметру РЕЛЬСЫ визуализирует результаты расшифровки дефектограмм как одного проезда, так и нескольких проездов по конкретному участку, проводит мониторинг и оценивает состояние рельсов и стрелочных переводов, совмещает данные средств НК с данными средств ТД (путеизмерительные вагоны и тележки), с паспортными данными участка, видеоданными, сравнивает результаты обработки нескольких файлов по участку с выделением повторяющихся мест и непроконтролированных участков и показывает нарушение графика и периодичности контроля, проводит мониторинг работы аппаратуры и персонала средств НК, формирует комплексную ведомость результатов диагностики средствами НК по поездке и за отчетный период, заполняет Банк Дефектов рельсов.

АПК АСТРА в настоящее время находится в опытной эксплуатации, в ходе которой отлаживается автоматический экспорт результатов анализа в КАСКАД. Дефекты или излом рельсов, выявленные АПК АСТРА или оператором-расшифровщиком и переданные в составе пакета данных, сохраняются в «Банке дефектов», дополняясь данными о состоянии ж.д. пути (паспортными характеристиками, данными путевых измерений и т.д.). Удобная поисковая система позволяет делать любую статистическую выборку, формировать отчеты. Функциональность комплекса систематически расширяется.

Скорость обработки информации до 200 км в час, тогда как норма на ручную расшифровку 500 км в месяц. Комплекс может работать круглосуточно, выполняя в автоматическом режиме все задачи, существует как в локальной, так и в сетевой версии. Сетевая версия отличается наличием *менеджера* комплекса, отсюда же эксперт выполняет просмотр обнаруженных значимых мест, разделенных по степени опасности. Программное обеспечение позволяет просматривать дефектограммы в ленте, по кадрам, по критериям, в режиме автоматизированной расшифровки, в режиме совмещения с планом железнодорожного пути и отступлениями габаритов рельсовой колеи. Одной из востребованных функций стало формирование пакета данных для срочной пересылки, когда необходимо отправить фрагмент файла с местом излома или ОДР, ведомость контроля и фото экрана. Данная работа выполняется совместно с НИИ мостов.

СЕКЦИЯ 10. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

Руководители секции: Иванов В.И., Муравьева О.В.,
Кожаринов В.В.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Овчарук В.Н.

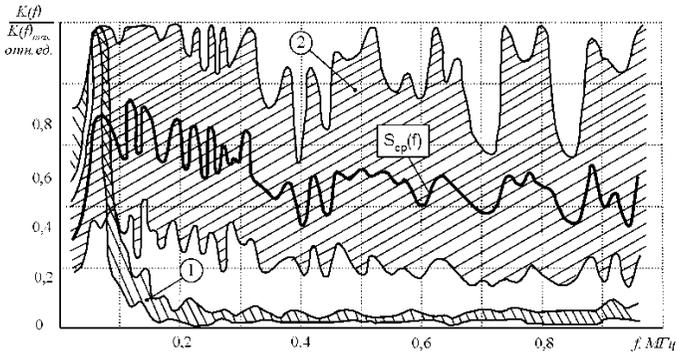
ГОУ ВПО «ТОГУ», Хабаровск, Россия

Известно, что АЭ материала представляет собой процесс испускания упругих волн, вызванных локальной динамической перестройкой его структуры. Если учесть, что аварии и катастрофические разрушения на промышленных объектах в большинстве случаев происходят из-за образования и дальнейшего развития трещин в материале объекта, то наиболее внимание при изучении свойств АЭ следует уделить именно процессу трещинообразования. Трудности реализации метода АЭ связаны с тем, что мы технически не в состоянии зарегистрировать каждый акт АЭ в отдельности. Мы вынуждены анализировать лишь ту часть коллективного процесса, которая оказалась выше порога чувствительности нашей аппаратуры.

Твердое тело представляет собой случайный набор структурных образований. При рассмотрении на одном масштабном уровне его можно представить как набор зерен на поверхности разрушения. Эти зерна могут иметь случайные формы. Процесс роста трещины при этом не трудно представить, как процесс последовательного разрушения его отдельных структурных образований (зерен). При этом каждому когерентному разрушению отдельного зерна будет соответствовать излучение соответствующего единичного импульса АЭ, параметры которого как не трудно предположить будут индивидуально соответствовать форме и размеру разрушившегося зерна. Последовательность сформировавшихся таким образом импульсов и образует коллективный АЭ процесс.

Из выше изложенного очевидно вытекает, что энергия сигнала АЭ от развивающейся трещины будет весьма неравномерно распределена по частотному диапазону, и эта неравномерность будет носить случайный характер. Ведь каждый сигнал АЭ и, соответственно его спектр, будут являться в своем роде уникальным образованием в силу особенностей формирования и распространения. Это требует измерения энергетических и амплитудных характеристик сигнала АЭ в широкой полосе с учетом вклада всех частотных составляющих.

Объекты контроля из металлов, керамики и других материалов с высокими упругими свойствами можно с очень малой погрешностью считать линейными системами. В общем случае модуль спектральной характерис-



**Рис. 1. Спектральные характеристики акустических сигналов;
 $S_{cp}(f_i)$ – среднее значение СХ сигналов АЭ:**

1 – область пребывания СХ-шумов трения; 2 – область пребывания СХ-сигналов АЭ

тики сигнала, снимаемого с выхода преобразователя, определяется выражением: $S_{пр}(\omega) = S_{н}(\omega) K_{тр}(\omega) K_{пр}(\omega)$, где $S_{пр}(\omega)$ и $S_{н}(\omega)$ – модули спектральных характеристик соответственно сигнала на выходе преобразователя и источника АЭ; $K_{тр}(\omega)$ и $K_{пр}(\omega)$ – АЧХ соответственно акустического тракта (объекта контроля) и преобразователя.

Рассмотрим процесс формирования сигналов АЭ на примере малоцикловых усталостных испытаний образца из титанового сплава на четырехточечный изгиб. При испытаниях использовался образец в виде прямоугольной балки 400x90x36 мм с инициированной усталостной трещиной. Анализ спектра производился в диапазоне частот 30...960 кГц. Сигналы АЭ регистрировались за один цикл нагружения, максимальная нагрузка в котором превышала предыдущее значение на 5...10 %. Такая методика позволяет устойчиво регистрировать сигналы АЭ на пике функции $P(t)$.

Полученные спектрограммы $^j S(f_i)$ подвергались нормализации по максимальному значению $^j S_{н}(f_i) = \frac{^j S(f_i)}{^j \bar{S}_{max}(f_i)}$ и простейшей обработке, где в качестве основных параметров рассматривали среднее значение i -й спектральной составляющей по ансамблю и ее дисперсию:

$$S_{cp}(f_i) = \frac{1}{z} \sum_{j=1}^z ^j S_{н}(f_i), \quad G_S(f_i) = \frac{1}{z-1} \sum_{j=1}^z \left[^j S_{н}(f_i) - S_{cp}(f_i) \right]^2.$$

На рис. 1 приведен график среднего значения спектральных составляющих $S(f)$ и область допустимых граничных значений для сигналов АЭ

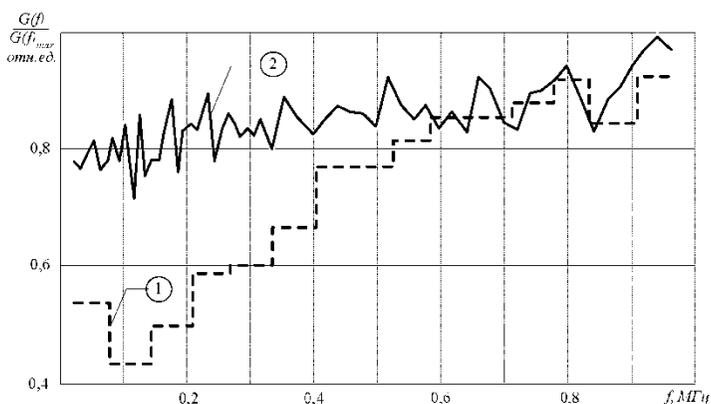


Рис. 2. Дисперсия с усреднением спектральных характеристик по частоте (1) и без усреднения (2)

(обл. 1), и шумов трения в опорных точках (обл. 2). Из приведенных графиков следует, что нормированные спектральные функции, лежащие в области 1 и 2 в диапазоне частот 0,12...1,0 МГц, не перекрываются и отстоят друг от друга на значительном расстоянии. Следует особо подчеркнуть, что спектр сигналов шумов трения в рассматриваемом случае носит квазистационарный характер. Что же касается нормализованных спектральных характеристик сигналов АЭ, полученных в одинаковых условиях и за короткий промежуток времени (один цикл нагружения), то видно, что они значительно отличаются одна от другой, а область допустимых граничных значений занимает широкий диапазон.

Чтобы снизить влияние неравномерности АЧХ образца и выявить основные отличия в спектре исходных сигналов АЭ, в программу обработки было введено частотное усреднение с полосой $\Delta f = 60$ кГц. Как показывает опыт, этого достаточно, чтобы сгладить неравномерность АЧХ образца таких размеров. Однако даже при таком усреднении наблюдается значительное отклонение спектральных характеристик от среднего значения, что наглядно демонстрируется на рис. 2.

На рис. 2 приведены графики дисперсии $G_S(f_i)$ с усреднением функции $jS_n(f_i)$ по частоте и без усреднения. Как видно, введение усреднения позволяет снизить значение $G_S(f_i)$ только в области низких частот за счет снижения погрешности, вносимой при нормализации спектрограмм. В области же верхних частот (более 0,6 МГц) значения $G_S(f_i)$ остаются неизменными. Это свидетельствует о том, что разброс параметров спектральных характеристик сигналов АЭ объясняется не только влиянием АЧХ образца, но и различиями в спектре исходных сигналов АЭ.

ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Овчарук В.Н.

ГОУ ВПО «ТОГУ», Хабаровск, Россия

В начале 60-х годов, когда противостояние двух великих держав стимулировало бурное изучение явления акустической эмиссии (АЭ), специализированной аппаратуры для этого не существовало. Особенности формирования и распространения сигналов АЭ – сложный спектр, низкий энергетический уровень, широкий частотный и динамический диапазон и др., предъявляли высокие требования к измерительной аппаратуре [1]. АЭ аппаратура должна была обладать высокой чувствительностью, большим коэффициентом усиления, минимальным уровнем шумов и вносить минимальные искажения. Всем этим требованиям в те годы удовлетворяла аппаратура для регистрации ионизирующих излучений. Кроме того, большинство исследователей нового явления были физиками-ядерщиками. Вполне естественно, что приемно-измерительные устройства, предназначенные для усиления и измерения электрических сигналов на выходе детектора ионизирующих излучений, стали использоваться для регистрации слабых упругих колебаний сигналов АЭ путем простой замены детектора на пьезоэлектрический преобразователь. При измерении ионизирующих излучений в те годы широко использовались приборы на базе счетчиков Гейгера-Мюллера, шкала которых была отградуирована в количестве импульсов в единицу времени. Эти устройства получили название интенсиметров, а измеряемая ими величина – интенсивность. Это было удобно при регистрации частиц, энергетические характеристики которых известны заранее. При этом подразумевалось, что для получения действительных значений интенсивности ионизирующих излучений необходимо полученный результат умножить на поправочный коэффициент, значение которого зависит от преобразователя, а так же вида и энергии регистрируемого ионизирующего излучения. При использовании электронной аппаратуры подобного типа для регистрации акустической эмиссии эта тонкость была потеряна. В результате самый распространенный параметр сигналов АЭ – интенсивность или скорость счета оказался лишенным физического содержания, так как в отличие от ионизирующих излучений здесь число импульсов в единицу времени никак не связано с интенсивностью ультразвуковой волны, распространяющейся по деформируемому телу...

Нельзя сказать, что эта ситуация была никому не известна. Еще в начале 80-х годов были проведены эксперименты, наглядно показавшие, что применение параметров акустической эмиссии, основанных на счете импульсов (суммарный счет АЭ, число импульсов АЭ, скорость счета АЭ,

активность АЭ) для количественного описания закономерностей акустической эмиссии неизменно приводят к низкой воспроизводимости результатов. Такая ситуация в измерениях возникает при наличии не исключенных систематических погрешностей и свидетельствует о некорректности измерений вследствие неправильного выбора физических величин, характеризующих процесс.

Если сопоставить основные единицы измерения АЭ с единицами Международной системы единиц [2], то видно, что при описании АЭ общепринятые акустические величины практически не используются. Аналогичная ситуация наблюдалась до начала 70-х годов в области измерений ионизирующих излучений, именно благодаря широкому использованию единиц физических величин, основанных на счете импульсов. При переходе к Международной системе единиц произошло определенное упорядочение в применении величин и единиц, характеризующих ионизирующее излучение и его поле, что повысило достоверность результатов измерений. К сожалению, в области АЭ измерений этого не произошло. Все существующие нормативные документы, начиная с ГОСТ 2763–83 и заканчивая вполне современными РД 03-131–97 и РД 03-299–99, рекомендуют к использованию параметры, основанные на счете импульсов.

Несовместимость результатов экспериментальных исследований и огромные погрешности измерения распространяются не только на параметры, основанные на счете импульсов. Такие параметры как максимальное значение сигнала АЭ (амплитуда), средняя мощность сигнала АЭ, энергия сигнала АЭ, физический смысл которых сомнению не подлежит, измеряются современными АЭ системами с недопустимо высокой погрешностью. Следует помнить, что процесс испускания волн эмиссии не является стационарным. Энергия сигнала АЭ очень неравномерно распределена по частотному диапазону и один сигнал АЭ абсолютно не похож на другой. Они очень сильно отличаются друг от друга по соотношению амплитуд в области низких и высоких частот. В таких условиях главным источником погрешности и нестабильности становится нежелание исследователей работать в широкой полосе частот. Их можно понять – при расширении полосы пропускания приемного преобразователя падает его чувствительность. Желание поймать как можно больше «рыбки» вынуждает пользователей работать в узкой полосе частот. При этом погрешность регистрации параметров, связанных с амплитудой и энергией сигналов АЭ будет превышать 100 %, и их измерение теряет смысл. Как следствие появляется та самая пресловутая несопоставимость. Исследователи пытаются решить эту проблему, проявляя чудеса изобретательности, в результате чего появляется множество параметров, физический смысл которых объясняется с трудом.

Автор еще в 1982 г. на X Международной конференции по неразрушающему контролю в г. Москве на основании спектрального анализа результатов экспериментальных исследований АЭ свойств различных мате-

риалов наглядно показал несостоятельность использования традиционных параметров при анализе сигналов АЭ в узкой полосе частот [3], и неоднократно подтверждал это в своих последующих работах. Ситуация складывается парадоксальная. Получается, что большинство параметров АЭ измерить просто невозможно. Речь может идти только о регистрации некоего события, достоверность которого еще нужно доказать. Ситуация заставляет рядового специалиста по неразрушающему контролю, в лучшем случае прошедшего краткий курс обучения при аттестации, превращаться в ученого-экспериментатора. Такое превращение многим не под силу, что и является основной причиной слабого использования метода АЭ. Он по-прежнему остается уделом избранных и широким полем для проведения и внедрения научных работ. В настоящее время существующие авторитетное справочное пособие по неразрушающему контролю [4] скромно рекомендует к применению двадцать шесть параметров, из которых восемнадцать являются первичными. Количество же вторичных параметров, используемых исследователями в своих работах, неуклонно растет с каждой новой диссертацией и давно превышает разумный предел.

На основании выше изложенного считаю необходимым отделить регистраторы, коими является большинство современных средств АЭ контроля, от измерительной аппаратуры и в новых разработках делать упор на качественном измерении ограниченного количества параметров, имеющих физический смысл. При регистрации амплитуды сигнала необходимо учитывать ее распределение по частоте, связывая каждое значение амплитуды с соответствующей частотой колебаний. Категорически не следует проводить измерение энергии сигнала в узкой полосе частот, стыдливо называя результаты таких измерений «энергетическими параметрами». Энергетические параметры, как и сама энергия акустического излучения, могут быть получены только на основании анализа всего спектра колебаний. Необходимо создать комиссию с целью выработки основных положений нормативного документа, определяющего правила организации и проведения АЭ-контроля и регламентирующего основные требования к АЭ аппаратуре.

Список литературы

1. **Грешников В.А., Дробот Ю.Б.** Акустическая эмиссия. – М., 1976. 272 с.
2. **Единицы** физических величин: Сб. норм.-техн. док. – М., 1987. 176 с.
3. **Experience** of acoustic emission application for technological and in service inspection / В.И. Бачегов, А.И. Горбунов, Ю.Б.Дробот и др. // Сб. докл. X Межд. конф. по неразрушающему контролю. – Москва. 1982. С.
4. **Неразрушающий** контроль: Справочник / Под общ. ред. В.В. Ключева. – 2-е изд., испр. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.: ил.

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Кондратенко Н.А., Барат В.А.
*МЭИ (ТУ), кафедра Электротехники и
интроскопии [ЭИ], Москва, Россия*

Доклад посвящен вопросам исследования сигналов акустической эмиссии от коррозионного дефекта. Проблема поиска и слежения за развитием коррозионных дефектов является одной из актуальных задач неразрушающего контроля. Применение акустико-эмиссионного контроля при исследовании коррозии может помочь выявлять механизм коррозионного процесса, установить количественные связи между интенсивностью коррозионного процесса, параметрами окружающей среды и акустико-эмиссионными параметрами.

Разработана методика проведения эксперимента по ускоренным коррозионным испытаниям, и создана установка для приложения растягивающего изгибного напряжения к пластине с коррозией.

По разработанной методике проведена серия экспериментов по выявлению коррозии. Целью экспериментальных исследований было выявление зависимостей между химическими процессами коррозии и характеристиками регистрируемых акустической эмиссии сигналов, а так же выявление влияния внешних факторов на протекание коррозии и изменение характеристик сигналов акустической эмиссии. Были изучены следующие факторы: время воздействия поляризующего напряжения, концентрация электролита в коррозионном растворе, приложение растягивающего изгибного напряжения.

Анализ записанных сигналов показал существование зависимости между активностью акустической эмиссии и ростом глубины коррозионного дефекта. Анализ зависимости активности акустической эмиссии от времени позволяет выделить стадии развития коррозионного дефекта от инициации до пассивации. Проведенный анализ амплитудного распределения показал, что при развитии коррозии также происходит уменьшение величин b - и Ib -параметров. Локальные минимумы на графике b - и Ib -параметров от времени соответствуют активации процессов образования микротрещин.

При изучении характеристик сигналов АЭ от коррозии при изменении внешних параметров было выявлено, что увеличение времени воздействия поляризационного напряжения не влияет на характер протекания процесса коррозии, но увеличивается интенсивность и длительность процесса. Химические процессы и процессы образования трещин идут интенсивней, что отражают характеристики сигналов АЭ: активность АЭ, b - и Ib -параметры. При приложении растягивающего изгибного напряжения процессы микротрещинообразования идут активней, более интенсивное образование тре-

щин приводит к генерации сигналов АЭ большой амплитуды и увеличению b - и Ib -параметров.

Представленные в данном докладе данные имеют практическое значение, поскольку могут быть использованы для оценки стадии коррозии, а так же для оценки скорости и механизма протекания коррозии.

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ИНФОРМАТИВНОСТИ АКУСТИКО ЭМИССИОННОГО И ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНО ЧАСТОТНОГО МЕТОДОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Кожаринов Вал.В., Кожаринов Вл.В.
TUVNordBaltic, Rīga, Латвия

При решении задачи выделения и распознавания (в том числе геометрических параметров) скрытых дефектов бывает трудно построить достаточно строгий формализованный алгоритм распознавания даже заданных дефектов для принятия правильных решений в обстановке неполной и нечеткой информации. Возникающие при этом сложности решения задач компьютерной идентификации относят к проблемам решения так называемых «трудно формализуемых» задач. Эффективным подходом к решению трудно формализуемых задач в настоящее время является подход, основанный на примерах («case-based» – подход), при использовании которого надо иметь лишь достаточное количество примеров для настройки адаптивной системы распознавания дефектов с заданной степенью достоверности. Классическим примером такого подхода являются искусственные нейронные сети.

В силу больших требований к вычислительным ресурсам до недавнего времени нейронные сети не находили широкого применения для решения задач данного класса. В настоящее время, когда вычислительные системы стали достаточно мощными, появились возможности для исследований в направлении использования нейронных сетей в системах неразрушающего контроля.

Главной отличительной особенностью нейронных сетей является то, что нейросети в принципе не нуждаются в заранее известной модели реального процесса, а строят решение на основе предъявляемой им тестовой информации.

Выбор модели нейронной сети зависит от особенности и сложности задачи. Для большинства типовых задач, решаемых нейронными сетями, уже существуют оптимальные решения. Наиболее популярной для анализа данных и обработки информации является многослойная сеть. Мы использовали известную модель нейронной сети, получившей название перцеп-

трон. Перцептрон это прямоточная (feed-forward) нейронная сеть, использующая функционал вычисления выходных сигналов нейрона в виде смещенной функции Дирака. Массив содержит такие параметры нейронной сети как количество слоев, число нейронов в слоях, значения весовых коэффициентов связи и смещения нейронов.

Эффективность процесса синтеза конкретной нейронной сети определяется степенью соответствия ее характеристик (топология сети и структуры связей, функционала комбинирования входящих сигналов, способа обучения неронной сети для определения значений весовых коэффициентов и др.) общим правилам, предъявляемым к объектам класса «нейронные сети».

Разработан нейросетевой метод поддержки принятия решения при разрушающем контроле изделий акустико эмиссионным и электроразрядным частотным методами, целью которого являлось повышение достоверности разбраковки за счет интеграции в существующую систему контроля дополнительного программного модуля с открытым исходным кодом, содержащего реализацию нейронной сети.

При разработке нейросетевого метода была создана методика формирования входных информативных сигналов, обеспечивающая адекватность принятия решений нейронной сетью на модельных дефектах с использованием акустико эмиссионного и электроразрядно частотного методов неразрушающего контроля.

АЭ ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА РИСКА АВАРИИ

Панчиков В.Н., Власов И.Э., Иванов В.И.

ОАО «Оргэнергонефть», Самара, Россия

В докладе рассматривается возможность оценки вероятности разрушения объекта (риска) с использованием метода акустической эмиссии (АЭ). Предположения о возможности оценки риска аварии сделаны при регистрации сигналов АЭ на различных этапах «жизни» объекта. Показано, что качество оценки возможности аварии наиболее высоко на заключительной стадии жизни объекта, который идентифицируется по регистрации катастрофически активного источника АЭ.

Метод АЭ имеет два основных направления: 1) исследование процессов деформации и разрушения; 2) контроль промышленного оборудования и сооружений. Во втором случае АЭ контроль должен преобразоваться в «АЭ Техническую Диагностику» (АЭ-ТД), которую мы определяем как: «Метод АЭ определения технического состояния объекта с целью оценки промышленной безопасности и прогнозирования ресурса». Метод АЭ-ТД может дать значительно больше полезной информации для оценки безопасности объекта, чем любой другой метод НК.

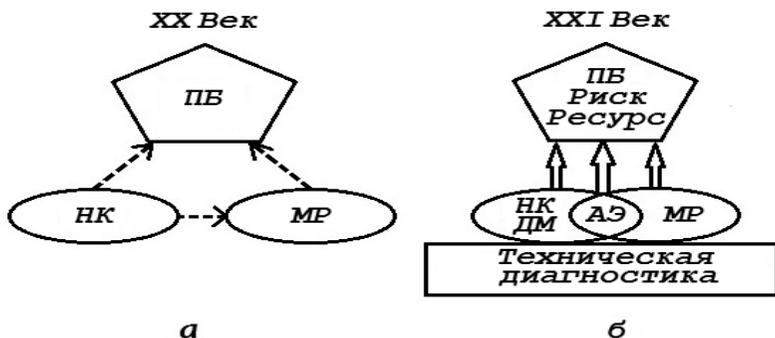


Рис. 1. Схемы оценки промышленной безопасности (ИБ) с использованием НК, технической диагностики и оценки риска.

Развитие подходов в использовании НК при оценке ИБ:

- а* – связи характерные для XX века; МР – Механика Разрушения;
- б* – современные связи; ДМ – дефектометрия

Информация, содержащаяся в сигналах АЭ, позволяет: во-первых, оценить прочность и безопасность объекта в момент контроля (испытания на прочность и плотность); во-вторых, предсказать ресурс объекта. И в этом и в другом случае конечные результаты контроля следует в конечном итоге представлять в терминах оценки риска. Риск аварии является количественной мерой безопасности. Конечной целью любого метода НК является получение информации, которая поможет предотвратить аварию.

Метод АЭ, объединяя технологические приемы НК и расчетные методики МР позволяет избежать большую часть ошибок подхода, приведенного на рис. 1, *а* и соответствуют подходу на рис. 1, *б*. Поэтому метод АЭ имеет наиболее мощный потенциал для определения важнейших показателей – ресурса, риска и других показателей.

Метод АЭ обладает максимальным потенциалом при обнаружения дефектов приводящих к аварии. Однако развитие метода АЭ после многообещающих первых этапов приостановилось. В настоящее время развитие идет вширь, а не вглубь. Требуется переход на следующую ступень. Эта ступень характеризуется принципиально новыми требованиями к оценке результатов АЭ контроля. При полной реализации потенциала метода мы должны определить безопасность, ресурс и оценить правдоподобность этих параметров, и, в конце концов – риск. Пока риск (вероятность аварии) можно оценить с приемлемой достоверностью только для катастрофически активных источников, на заключительной стадии разрушения объектов. Необходимо стремиться к тому, чтобы при регистрации каждого импульса АЭ можно было бы оценить величину шага деградации объекта и увеличение риска аварии.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ БОКОВЫХ РАМ И НАДРЕССОРНЫХ БАЛОК ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Муравьев В.В., Муравьева О.В.

*Ижевский государственный технический университет,
Ижевск, Россия*

На сети железных дорог России к 2001 году сложилось критическое положение с литыми элементами тележек грузовых вагонов, вызванное острой нехваткой новых деталей. Для разрешения проблемы Департамент вагонного хозяйства ОАО «РЖД» принял решение о продлении срока службы по результатам индивидуальных испытаний каждой детали с истекшим сроком эксплуатации. В основу методики продления срока службы положены магнитные методы (МП и ФЗ) и метод акустической эмиссии (АЭ). Общая концепция продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов модели 18–100 методом АЭ производится в настоящее время по утвержденному технологическому процессу в соответствии с методикой № 682–2005 ПКБ ЦВ (с изменениями). Испытанию подлежат боковые рамы, отработавшие установленный срок эксплуатации или приближающийся к нему (29–30 лет). Методика продления срока службы литых деталей внедрена во всех железнодорожных администрациях, входящих в состав СНГ. В настоящее время более 100 вагонных ремонтных депо оснащены АЭ стендами, разработанными в Сибирском государственном университете путей сообщения совместно с Сибирским НИИ авиации (СЦАД) и ПКБ ЦВ ОАО «РЖД» совместно с ООО «Интерюнис» (A-Line).

На рис. 1 представлены сравнительные результаты по продлению срока службы боковых рам акустико-эмиссионным методом с использованием двух используемых систем.

Несмотря на неоспоримые преимущества, широкое использование метода АЭ сдерживается отсутствием обоснованных критериев чувствительности метода. Предложены подходы к обоснованию критериев чувствительности акустико-эмиссионного метода контроля к развивающимся дефектам боковой рамы тележки грузового вагона с позиций теории упругости, теории статической и динамической прочности.

С позиций теории упругости сопоставление амплитуд электрических импульсов АЭ с уровнями сигналов АЭ, регистрируемых в ходе реальных испытаний боковых рам тележки грузового вагона (рис. 2, а), позволяет оценить размеры скачков трещин, выявляемых методом АЭ, и сопоставить по уровню чувствительности магнитопорошковый и акустико-эмиссионный методы контроля. Уровень регистрируемых напряжений $U_{эл} = 1 \dots 6$ мВ соответствует диапазону скачков $S = 1,5 \cdot 10^{-8} \dots 6 \cdot 10^{-8}$ м²

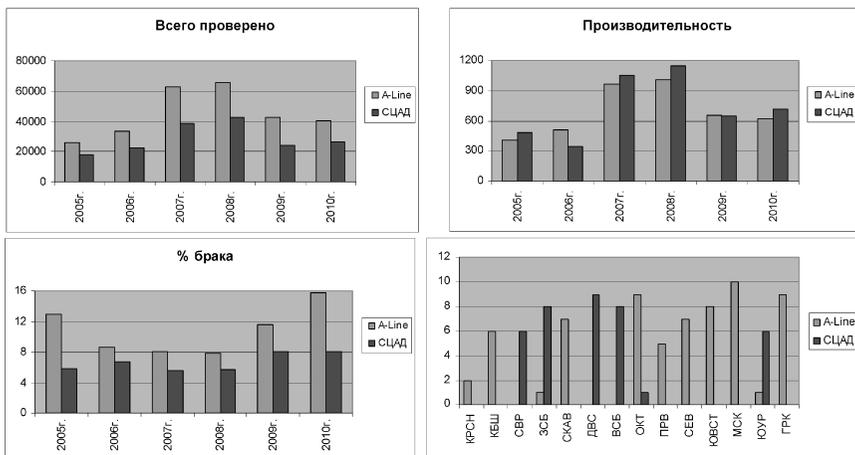


Рис. 1. Результаты акустико-эмиссионного контроля боковых рам при продлении срока службы с использованием установок СЦАД и A-Line

или длине трещины $l = 0,3...6$ мм при размере усталостной бороздки $\Delta = 0,1...3$ мкм. Рассчитанные значения размеров трещин соответствуют ГОСТ Р 52727–2007 и удовлетворительно совпадают с принятыми критериями браковки магнитопорошковым методом в соответствии с РД 32.159–2000.

Использование положений статической теории прочности (рис. 2, б) позволяет оценить характер напряженного состояния вблизи вершины трещины в области внутреннего угла буксового проема боковой рамы, а также размеры начальных очагов и уровень механических напряжений,

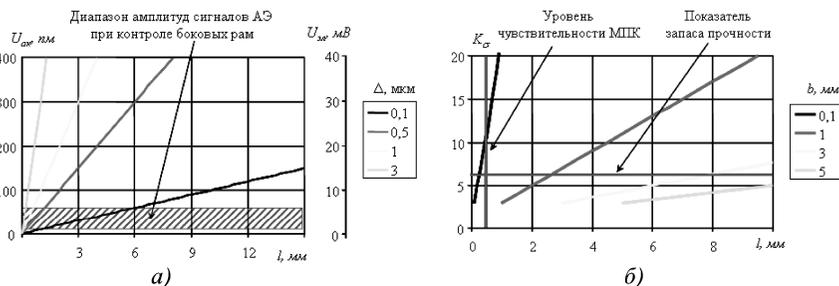


Рис. 2. Зависимости амплитуд электрического и акустического импульсов АЭ от размеров прироста трещины (а); зависимость коэффициента концентрации напряжений в вершине дефекта с полуосями l и b (б)

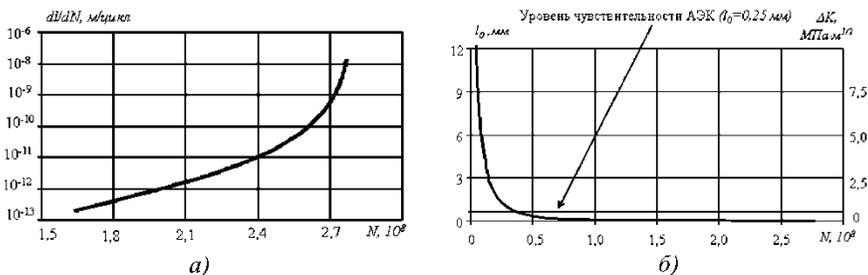


Рис. 3. Зависимость скорости роста усталостной трещины (а) и длины начальной трещины от числа циклов нагружения (б)

достаточный для излучения волн АЭ. При уровне нагружения по внутреннему углу буксового проема 80 МПа, коэффициент запаса прочности, эквивалентный коэффициенту концентрации напряжений составляет ~ 6 , и обозначает уровень, начиная с которого микротрещины будут развиваться, а следовательно, излучать волны АЭ.

Согласно усталостному критерию на основании кинетической диаграммы усталостного разрушения построены зависимости абсолютной длины и скорости роста усталостной трещины от числа циклов нагружения (рис.3), согласно которой может быть оценено влияние длины начальной трещины в детали на ее циклическую долговечность.

Предложенные подходы позволили оценить предельную чувствительность метода акустической эмиссии к размерам скачков усталостных трещин; размеры начальных очагов зарождения усталостной трещины и уровень механических напряжений, достаточный для излучения волн АЭ; влияние начальной трещины в детали на ее циклическую долговечность.

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» (Рег. номер: 2.1.2/12069).

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ, АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВЕРОЯТНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Комаров А.Г.

ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», Волгоград, Россия

Доклад посвящен анализу существующего состояния программного обеспечения (ПО), разработанного для регистрации, анализа и оценки данных акустико-эмиссионного контроля (АЭК) как компаниями – производителями оборудования для акустико-эмиссионной диагностики, так и сторонними разработчиками, а также роли ПО в повышении безопасности и достоверности АЭК.

Приведено сопоставление характеристик и параметров, регистрируемых и формируемых различными АЭ системами, доступности и совместности ПО различных производителей. Изложены возможности, преимущества и недостатки ПО некоторых распространенных АЭ систем. Даны примеры реализации систем критериальной оценки результатов АЭК в ПО различных производителей.

В докладе показаны пути компенсации некоторых недостатков существующего ПО за счет совместного использования различных программных пакетов анализа данных АЭК. Приведены практические примеры совместной работы ПО различных АЭ систем.

В докладе сделана попытка обобщить проблемы в области разработки и использования ПО, оценить требования к «идеальному» программному обеспечению для АЭК, и возможные перспективы развития такого ПО.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЕ И АКУСТОУПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕРЖНЕВОЙ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОЛОКАХ

Муравьев В.В., Муравьева О.В., Платунов А.В.
*ФГБОУ ВПО Ижевский Государственный
Технический Университет, Ижевск, Россия*

При изготовлении металлической проволоки волочением исходные заготовки подвергаются значительным деформациям, изменяется структура, появляются остаточные напряжения и текстура. После обработки возможно появление утяжин, дефектов в виде микроразрывов, изменение геометрии, неоднородности остаточных напряжений по длине. Поэтому контроль подобного рода дефектов и геометрических параметров проволоки является актуальной задачей.

Акустический метод контроля является объемным, чувствительным к различным дефектам и изменению структурного состояния. Он наиболее информативен вследствие применения различных типов волн, способов измерения амплитуды, времени, частоты ультразвуковых колебаний.

При исследованиях структурного состояния проволоки целесообразно использовать стержневую волну Похгаммера в области минимальной дисперсии скорости (малых произведений fd , где f – частота волны, d – диаметр объекта). Низкое затухание стержневой волны и отсутствие расхождения позволяет многократно увеличить базу прозвучивания проволоки по сравнению с объемными волнами, а, следовательно, существенно повысить точность метода акустической структуроскопии.

Для отстройки от качества акустического контакта, во многом определяющего точность и воспроизводимость метода акустической структуроскопии, целесообразно использовать бесконтактный электромагнитно-акустический (ЭМА) способ ввода и приема акустических волн.

Исследования энергетических воздействий на образцах проволоки из углеродистых сталей и сплава викаллой диаметром 0,3...0,5 мм проводились импульсным методом. Термическая обработка проволок проводилась по двум вариантам: с помощью пропускания постоянного электрического тока и в калиброванной трубчатой печи при температурах 200...1200 °С. Наблюдался рост скорости стержневой волны, как при увеличении силы пропускаемого тока, так и при повышении температуры отжига. Это можно объяснить снятием остаточных напряжений, возникших при волочении, термической обработкой. Максимум скорости акустической волны наблюдается в области воздействий, соответствующих фазовому переходу первого рода. При дальнейшем увеличении температуры отжига скорость волны уменьшается, что связано с получением нового структурного состояния в образце.

Структурное состояние в образцах при повышении температуры отжига по результатам металлографического анализа изменяется от ярко выраженной текстуры наклепа к собирательной и полной рекристаллизации.

Исследованы влияния приложенных растягивающих нагрузок на информативные параметры стержневой волны. Образцы подвергались воздействиям, меньшим предела текучести, величина растяжения оценивалась по калиброванному электронному динамометру ДОРЗ-0,3И. С увеличением прилагаемых нагрузок отмечается уменьшение скорости волны во всех исследуемых образцах. При снятии нагрузок значение скорости стержневой волны возвращалось к исходным значениям, за исключением проволок после высокотемпературного отжига (выше 800 °С). Отмечено, что при росте растягивающих нагрузок наблюдается повышение эффективности ЭМА-преобразования – увеличение амплитуды волны.

По результатам исследований рассчитаны акустоупругие коэффициенты по скорости и по амплитуде для разных структурных состояний сталей.

Кроме этого, при использовании совмещенного ЭМА-преобразователя (работающего на излучение и прием) реализован метод многократных отражений, который позволяет в несколько раз повысить точность определения скорости волны при той же величине базы прозвучивания.

Также с использованием совмещенного ЭМА-преобразователя эхометодом были исследованы дефекты структуры, полученные отжигом ограниченной зоны проволоки на локальных участках образцов. Рассчитаны коэффициенты отражения эхо-сигналов от участков проволоки с измененной структурой, сопоставлены теоретические и практические расчеты. Показана возможность обнаружения участков локальных изменений структуры проволоки, отклонения сечения от номинала с помощью волны Поу-гаммера, а также определения координат и протяженности этих участков.

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)» (Рег. номер: 2.1.2/12069).

СЕКЦИЯ 11. НАНОДИАГНОСТИКА

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

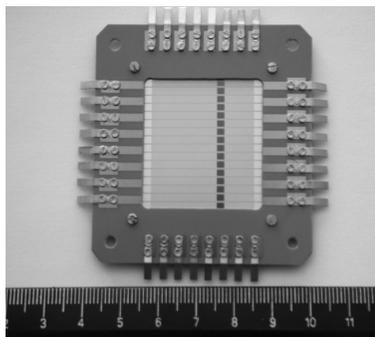
НАНОСЕНСОРЫ В ПРИБОРАХ НК

Клюев В.В., Матвеев В.И.,

ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

Продолжается совершенствование методов и средств НК с целью увеличения их чувствительности, точности, быстродействия одновременно с миниатюризацией основных узлов аппаратуры.

Наносенсоры – это современные чувствительные элементы преобразователей, изготовленные с помощью нанотехнологий, обеспечивающих улучшение основных параметров приборов контроля и диагностики за счет размерных и физических наноэффектов. В матричных преобразователях значительно уменьшаются размеры элементов (пикселей), шаг между ними, что приводит к улучшению разрешающей способности и быстродействия в диагностических процедурах. За счет размерных эффектов также улучшаются локальность контроля и массогабаритные параметры преобразователей. За счет наноэффектов повышается чувствительность сенсоров и преобразователей в целом.



Сегодня все методы НК при их реализации имеют практическую возможность использования наносенсоров и нанопреобразователей. Так, уже разработаны и применяются матричные нанопреобразователи для портативных газоанализаторов, магнитовизоров, ИК-техники, терагерцовых, рентгеновских и гамма-интроскопов. На приведенном рисунке показана современная матрица кремниевых альфа-детекторов нейтронов и гамма-квантов, изготовленная на основе нанотехнологий, применяемая в устройствах обнаружения и идентификации закамуфлированных взрывчатых и наркотических веществ.

Известно также о проводимых работах по разработке на основе нанотехнологий ультразвуковых фазированных антенных решеток и вихретоковых матричных преобразователей.

Линзы, формирующие изображение, изготовленные из метаматериалов с отрицательным показателем преломления, позволяют получать изо-

бражение с более высоким разрешением, превосходя дифракционный предел. Использование таких элементов в микроволновых, терагерцовых и оптических системах диагностики несомненно повысит их эксплуатационные параметры.

Новые наноразмерные сверхвысокочувствительные мембраны позволят создать современные многоканальные системы вибродиагностики сложных узлов и механизмов.

Необходимо также добавить о развитии техники нанозондирования и наноиндентирования применительно к решению задач по измерению нанотвердости, упругих свойств, шероховатости и структуры поверхности на нанометровом уровне.

Литература

1. **Клюев В.В., Матвеев В.И.** Нанопреобразователи для средств НК и ТД. «Контроль. Диагностика». № 10. 2008.
2. **Матвеев В.И.** Rusnanotech 2010. «Мир измерений». № 4. 2011.

НОВЫЙ ПОДХОД К ДЕФЕКТОСКОПИИ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Пушко С.В., Балиж К.С.

ЗАО «НТИ», Зеленоград, Москва, Россия

Доклад посвящен вопросам применения новых подходов к неразрушающему контролю промышленного оборудования с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии.

В настоящее время модернизация отечественной промышленности означает комплексное решение целого ряда производственных задач, в том числе связанных с внедрением новых подходов к диагностике действующего оборудования. Современные контрольно-измерительные приборы зачастую качественно отличаются от тех, которые использовались в рамках промышленных стандартов двадцать лет назад.

В 2010 году компания НТИ начала работу над созданием прибора для нужд промышленности, связанных с осуществлением неразрушающего контроля и диагностикой состояния конструкционных материалов промышленного оборудования.

Разработка ведется в рамках частно-государственного партнерства по Постановлению Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» (согласно Договору № 13.G25.31.0052 «Об условиях предоставления и использования

субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения»).

Первый вариант прототипа такого специализированного сканирующего зондового микроскопа был разработан и представлен под рабочим названием СОЛВЕР Пайп.

СОЛВЕР Пайп применим для определения структурных и механических характеристик материалов с нанометровым разрешением в производственных условиях.

В сравнении с используемыми методами исследования материалов, такими как оптическая микроскопия, рентгенография, электронная микроскопия, ультразвуковая дефектоскопия и прочие, атомно-силовая микроскопия (как разновидность СЗМ – сканирующей зондовой микроскопии) обладает рядом существенных преимуществ, такими как:

- сверхвысокое пространственное разрешение (до единиц нанометров);
- инструментальное оформление АСМ компактно и не требует использования сложной вакуумной и специализированной техники;
- по сравнению с оптической микроскопией АСМ позволяет существенно расширить диапазон увеличений при исследовании структуры материалов, АСМ-изображения структур материалов на разных уровнях увеличения содержат больше полезной информации;
- АСМ-изображения исходно оцифрованы и легко поддаются обработке;
- исследование образца посредством АСМ может сопровождаться одновременным измерением твердости материала;
- высокая скорость получения результатов;
- простота интерпретации получаемых данных;
- АСМ с успехом применяется для определения структурных и механических характеристик материалов.

СОЛВЕР Пайп был разработан специально для использования в промышленных условиях с возможностью крепления непосредственно на объекте исследования. Используя неразрушающие методы контроля, зондовый микроскоп позволяет регистрировать изменения в структуре материала в тот момент, когда характерные размеры этих изменений не превышают десятков нанометров (трещины, каверны, дефекты различной природы), другими словами, когда дефекты материала только начинают зарождаться. Одной из главных задач подобных исследований является оценка остаточного эксплуатационного ресурса изделия и, в конечном итоге, переход на его безаварийную эксплуатацию.

На базе сканирующего зондового микроскопа СОЛВЕР Пайп создается аппаратно-программный комплекс для исследования крупногабаритных промышленных объектов. Комплекс применим для диагностики материалов промышленного оборудования: участков трубопроводов, металлоконструкций, роторов турбин, химических реакторов, сосудов под давлением и пр.

В случае оснащения СЗМ–комплексами труднодоступных и отдаленных промышленных объектов появляется возможность мониторинга состояния материалов важных технологических объектов без присутствия человека с использованием удаленного доступа.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕД И МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Демин А.В., Золотаревский Ю.М., Иванов В.С., Левин Г.Г.
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва, Россия

Доклад посвящен вопросам диагностики и метрологического обеспечения в области микрооптических и нанооптических элементов, включая дифракционную оптику, преломляющую оптику, оптические волноводы, фотонные кристаллы, устройства на плазмонах, тепловизионные устройства и т.д. Диагностирование осуществляется измерительным комплексом с использованием оптического излучения в качестве зондирующего для исследования структуры и формы 3D-объектов аттестованными методами с использованием Государственных стандартных образцов. Вниманию предлагается комплекс неразрушающих измерений на основе интерференционной микроскопии, сканирующей ближнепольной оптической микроскопии и лазерно-спектроскопической системы. Комплекс разработан как метрологический и зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 45583-10. Технические параметры основных систем комплекса:

1. Интерференционно-спектральная система сверхвысокого разрешения, включающая в себя автоматизированную обработку интерферограмм, набор источников зондирования в широком спектральном диапазоне, систему 3D-позиционирования и систему сканирования. Система позволяет измерять показатель преломления наноразмерных по одной из осей (Z) объектов, находящихся, как в жидкой, так и твердой фазе в диапазоне от 1,39 до 1,65 с пределом допускаемой абсолютной погрешностью измерения не более $\pm 5 \cdot 10^{-5}$.

2. Система микроскопии/спектроскопии и поляриметрии ближнего оптического поля с зондами апертурного и безапертурного типов. Позволяет получать трехмерные топографические изображения объектов с разрешением вплоть до 1 нм и оптические изображения объектов с разрешением до 20 нм, в диапазоне измерений угла вращения плоскости поляризации $-40...+40^\circ$ с пределом допускаемой относительной погрешности $\pm 15\%$. Это соответствует величине наилучшего оптического разрешения, достигнутого в ближнепольной оптической микроскопии при использовании апертурного зонда [1]. Система ближнепольной оптической микроскопии

решает широкий круг задач, связанных с взаимодействием света и наноструктур (с характерными размерами порядков 1 мкм-10 нм).

3. Лазерно-спектроскопическая система измерений нелинейных восприимчивости второго и третьего порядков (процессов генерации второй и третьей гармоник, процесса самовоздействия) и распределения локальных электромагнитных полей оптического диапазона на поверхности полупроводникового слоя для гетероструктур (реализуемых в частности, в виде фотопреобразователей и матричных фотоприемных устройств, составляющих основу оптоэлектроники).

При помощи лазерно-спектроскопической системы были проведены измерения сигнала интенсивности второй гармоники на основном материале для тепловизионных датчиков – твердом растворе теллурида кадмия – ртути, получаемого методом молекулярно-лучевой эпитаксии.[2] Генерация второй гармоники осуществлялась в геометрии на отражение при падении под 45° к поверхности образца. Относительная погрешность таких измерений составила 4 % из-за флуктуаций лазерного излучения. Параллельно с генерацией второй оптической гармоники измерялись и особенности поверхности структуры интерференционно-спектральной системой или дифференциальной интерференционно-контрастной микроскопией Номарского [3]. Результаты предлагаемых измерений могут быть использованы для определения степени структурной неоднородности поверхности исследуемых образцов и создания карты распределения микроструктур на их поверхности.

Помимо измерительного комплекса были впервые созданы Государственные стандартные образцы нелинейной восприимчивости пористого кремния и стандартные образцы пористого фосфида галлия, фотонных кристаллов, позволяющие проводить калибровку и диагностирование комплексов, использующих изменения нелинейно-оптических параметров материалов.

В результате создания измерительного комплекса, стандартных образцов и аттестованных методик измерения решена задача обеспечения единства измерений и тем самым повышения надежности и безопасности создаваемой техники.

Литература

1. **Betzig E., Trautman J.K., Harris T.D. Weiner J.S., Kostelak R.L.** Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on nanometer scale // Science. 1991. Vol. 251. P. 1468–1470.

2. **Бурлаков И.Д., Демин А.В., Левин Г.Г., Пискунов Н.А., Заботнов С.В., Кашуба А.С.** «Измерение интенсивности генерации второй оптической гармоники в гетероэпитаксиальных структурах теллурида кадмия-ртути.» Измерительная техника, № 6. 2010.

3. **Бурлаков И.Д., Демин А.В., Заботнов С.В., Кашуба А.С.** «Генерация второй оптической гармоники в гетерогенных структурах теллурида кадмия – ртути». Прикладная физика, № 2. 2011.

СЕКЦИЯ № 12. ТЕЧЕЙСКАНИЕ

Руководители секции: Сажин С.Г., Тараненко Е.В.

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТРАСЛЕВЫХ МЕТОДИК КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С СОВРЕМЕННЫМИ ГЕЛИЕВЫМИ ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯМИ

Тараненко Е.В.

ДПИ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Дзержинск, Россия

Доклад посвящен рассмотрению вопросов практического применения различных действующих в настоящее время отраслевых методик масс-спектрометрического контроля герметичности при использовании современных течеискателей с микропроцессорным управлением. Требования обязательного выполнения отдельных положений этих стандартов противоречат инструкциям на такие течеискатели.

Применяемые в настоящее время отраслевые стандарты на методики масс-спектрометрического контроля герметичности составлялись десятки лет тому назад, в эпоху аналоговых стрелочных течеискателей.

Как правило, эти приборы имеют ограниченные возможности. Такие основные характеристики течеискателей и испытаний как величина регистрируемого потока, чувствительность и порог чувствительности определяются по формулам вручную, расчетным путем по величине естественного сигнала стрелочного индикатора (обычно в милливольтках). Поэтому в этих методиках требуется сначала провести отсчет фоновых сигналов и сигналов от течи, а затем пересчетом получить значения потока с учетом цены деления шкалы прибора усилителя постоянного тока.

В наше время цифровых технологий такой подход является полным анахронизмом и тормозом в применении современных гелиевых течеискателей с микропроцессорным управлением.

Современные течеискатели имеют следующие отличительные особенности обработки измерительной информации:

- автоматическое переключение диапазонов с учетом фонового сигнала;
- автоматическая компенсация фонового сигнала;
- тестирование настройки на пик гелия по встроенной калиброванной течи и коэффициента чувствительности;
- автоматический изменение коэффициента чувствительности в зависимости от режима и схемы испытаний (противоток, прямоток);
- вывод на индикатор показаний в единицах потока;
- цифровой интерфейс для связи с ПК и порт связи с принтером документирования результатов испытаний;
- возможность подключения аналоговых измерителей.

В режиме автообнуления (компенсации фонового сигнала) производится измерение фонового сигнала (остаточного уровня гелия), результаты которого затем автоматически вычитаются из всех последующих сигналов. При этом возможна работа в диапазоне чувствительности не более чем на два порядка меньшем, относительно того, из которого произведено обнуление. Это ограничение определяется погрешностью измерения фонового сигнала и его возможностью изменения в процессе испытаний.

Калибровка выполняется в автоматическом режиме путем подстройки коэффициента усиления до установления соответствия показаний сигнала от гелиевой течи на индикаторе (в единицах потока) величине потока указанного в паспорте на эту течь.

При положительном результате тестирования за порог чувствительности течеискателя принимают минимальный поток гелия, указанный в его паспорте.

Анализ алгоритмов автоматической обработки сигналов современных гелиевых масс-спектрометрических течеискателей и проверка их работоспособности позволяют сделать вывод, что они не противоречат общим положениям отраслевых стандартов. В тоже время, ручные пересчеты только усложняют и увеличивают трудоемкость испытаний и приводят к дополнительным субъективным ошибкам в оценке степени герметичности изделий.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАТВОРОВ ШАРОВЫХ КРАНОВ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

Степаненко О.А.
ТюмГНГУ, Тюмень, Россия

В теории и практике диагностирования газотранспортных систем до последнего времени преобладали, выработанные на основе зарубежного и отечественного опыта эксплуатации газопроводов в умеренных природно-климатических условиях, традиционные методики. В настоящее время опыт освоения месторождений в суровых климатических условиях показывает, что традиционных подходов не достаточно. Необходимы новые разработки, учитывающие особые условия эксплуатации магистральных газопроводов на Крайнем севере. Своевременная диагностика трубопроводных систем в сложных геолого-географических условиях является одним из основных направлений в обеспечении надежности, эффективности и экологической безопасности системы газоснабжения. Надежность системы газоснабжения определяет безотказная работа запорно-регулирующей арматуры. Герметичность ее узлов является основным требованием для бесперебойной работы. Износ уплотнительных поверхностей; снижение кондиционности уплотнительных паст и смазок; нарушение уплотнительных зазоров под воздействием дисбаланса монтажных нагрузок; механическое разрушение считаются основными причинами нарушения герметичности.

Наиболее уязвимые, имеющие большую вероятность разгерметизации это узлы запорной арматуры находящиеся в уплотнениях затворов и шпинделя, во фланцевых соединениях и соединительных патрубках, в сварных стыках, а также в самом корпусе. Эффективность восстановления герметичности зависит от своевременного обнаружения разгерметизации запорного узла с оценкой уровня образовавшейся утечки, величина которой характеризует невозвратные потери товарного продукта.

В связи с этим в ООО «Газпромэнергодиагностика» разработана не имеющая аналогов на рынке и в открытой литературе технология прямого измерения расхода газа через затворы шаровых кранов без прерывания технологического процесса транспортировки газа. Актуальность разработки обусловлена отсутствием эффективных и простых в использовании автоматизированных средств диагностики технического состояния запорно-регулирующей арматуры, что ведет к неоправданным дополнительным потерям газа. Используемое прямое измерение расхода газа позволяет оценивать показатели герметичности шаровых кранов с высокой достоверностью в терминах массового расхода, что позволяет получать достоверные выводы о финансовых затратах, вызванных потерями газа при эксплуатации кранов.

Проведены натурные испытания после анализа и обсуждения которых установлено:

- система позволяет осуществлять измерение массового расхода газа отдельно через уплотнения «высокой» и «низкой» стороны ШК с использованием прямого метода измерения расхода газа;

- реализуемая системой технология контроля герметичности затворов шаровых кранов предполагает подключение системы к шаровому крану в трех точках: трубопровод высокого давления, полость шарового крана, трубопровод низкого давления;

- не требуется изменений технологического режима, врезок в трубопровод, шурфовок, врезок в трубопровод;

- программный комплекс системы осуществляет расчет площади эквивалентных сечений, характеризующих степень поврежденности уплотнений шарового крана.

Разработанные технические решения, реализованные в системе рекомендовано применять для контроля технического состояния шаровых кранов.

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТАХ

Мясников В.М., Сажин С.Г., Костиков Е.С.

Дзержинский политехнический институт НГТУ им. Р.Е. Алексеева,

Дзержинск Нижегородской обл., Россия

В докладе предлагается способ локализации течей, в котором визуальный контроль заменен аппаратурным. Функции регистратора утечки выполняет вакуумметрический датчик терморезисторного типа.

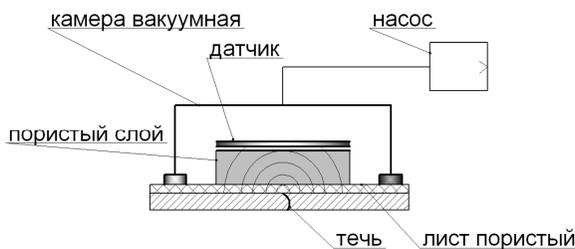


Рис. 1

Одной из причин выброса вредных веществ в окружающую среду является нарушение герметичности аппаратов и емкостей, используемых в химической и нефтяной промышленности. Чаще всего эти объекты периодически контролируют вакуумно-пузырьковым способом [1], основанным на регистрации пузырьков, образуемых при натекании воздуха через каналы течи в вакуумную камеру. К достоинству этого способа следует отнести отсутствие опрессовки полости контролируемого изделия избыточным давлением. Наряду с этим, способ имеет существенный недостаток. В нем регистрация течей производится визуально, а, следовательно, присутствует фактор риска пропуска течей.

На рис. 1 показана схема предложенного метода локализации течей. Эффект локализации течи в вакуумной камере достигается за счет создания между датчиком и контролируемой поверхностью области с низкой проводимостью, например, слоя материала с открытой структурой пор. Это позволяет уменьшить эффективную быстроту откачки утечки из порового канала. В результате в поровом канале увеличивается давление, а вместе с ним повышается теплоотдача с поверхности датчика, это является информационным признаком наличия течи между датчиком и контролируемой поверхностью.

Взаимодействие поверхности датчика с концентрационным полем утечки показано на рис. 2. Статическая чувствительность способа определяется геометрическими размерами датчика (a, b) и расстоянием (R) от течи до оси симметрии датчика. Значение R задается шириной (H) зоны контроля сварного шва. При получении одномерной дефектоскопической информации принимается $R = H$, для двухмерной – $R = 0,5 H$. Чувствительность контроля удобно оценивать по средней концентрации в области усреднения. В данном случае этой областью является площадь прямоугольника со сторонами a и b , поскольку через нее происходит отток тепла от терморезистивного слоя.

На диаграмме (см. рис. 3) показан характер изменения средней концентрации от вариации параметров a, b при $R = 4$ мм. Толщина пористого слоя составляет 5 мм, габариты – 50×50 мм. С увеличением R экстремальное значение средней концентрации смещается по координате b в сторону ее увеличения.

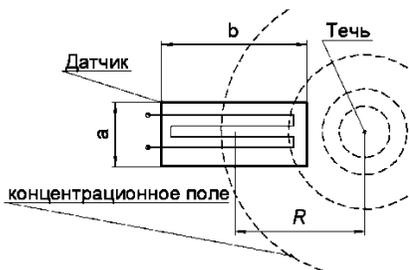


Рис. 1

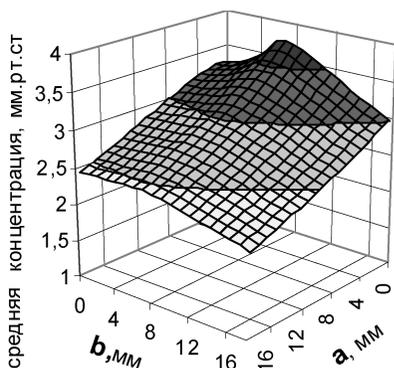


Рис. 2

Следует отметить, что на порог чувствительности, выявляемых течей, влияет доля площади датчика, где она контактирует со средней концентрацией утечки соизмеримая с давлением в вакуумной камере (фоновое давление).

Распределение утечки в пористом слое моделировалось авторами методом квазигомогенного приближения. В качестве механизма переноса утечки в пористом слое использовалась теория кнудсеновской диффузии. Для определения коэффициента кнудсеновской диффузии в пористой среде использовалась зависимость, основанная на кинетической теории [2]:

$$D_{кр} = \frac{8\theta^2}{3\tau S_g \rho_p} \left(\frac{2RT}{\pi M} \right),$$

где θ – доля свободного поперечного сечения пор; τ – коэффициент извилистости канала пор; S_g — поверхность пор, определяемая по методу Брунауэра–Эмента–Теллера; ρ_p – объемная плотность пористой массы. Зависимость позволяет определиться с выбором структуры пористого материала.

В докладе также представлены результаты исследования численного моделирования процесса локализации течей и статистическая оценка достоверности результатов контроля.

Литература

1. **Неразрушающий контроль:** Справочник: в 8 т. // Под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. Т. 2. – М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
2. **Шервуд Т., Пигфорд Р. Уилки Ч.** Массопередача. – М.: Химия, 1982. 696 с.

ОБРАБОТКА ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ УТЕЧКИ СПОСОБОМ ПАССИВНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Мясников В.М., Сажин С.Г., Костиков Е.С.

*Дзержинский политехнический институт НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, Дзержинск Нижегородской обл., Россия*

В докладе рассматриваются методы и средства метрологического обеспечения установок автоматизированного контроля.

Газоаналитический метод локализации утечки основан на регистрации концентрационного поля пробного газа. О месте расположения течи судят по топологии концентрационного поля в окрестности течи. Для этой цели используют способ шупа. Наибольшую производительность процесса локализации течи обеспечивает принцип пассивного сканирования, согласно которому, движение шупа производится по заданной траектории. В результате, информация о концентрационном поле будет представлена на дефектограмме в виде пика. Контролируемые параметры (величина потока течи и ее координаты) находятся по результатам формализации дефектоскопического пика. Основными параметрам являются высота, площадь, острота, ширина, асимметрия пика, а также время его появления. Координата места течи в направлении движения шупа определяется по появлению дефектоскопического сигнала с учетом времени его запаздывания. Положение течи относительно траектории движения пробоотборника определяется по соотношению площади пика к его высоте. На рисунке показаны зависимости, устанавливающие эту взаимосвязь. Зависимости получены для разных потоков анализируемых проб, поступающих в течеискатель.

Следует отметить, что фоновый сигнал не является постоянной величиной, он включает дрейфовую составляющую и флуктуацию. Фоновый сигнал имеет случайную природу, а дефектоскопический сигнал – детерминированную. Следовательно, все вышеперечисленные формализованные параметры дефектоскопического пика имеют взаимную связь. Тогда как в формализованных параметрах пика образованных флуктуацией фонового компонента эта связь отсутствует. Так, например, если отношение площади пика к высоте находится выше или ниже зависимости (см. рисунок), то полученные результаты формализации пика следует отнести к ложному пику. Достоверность локализации повышается, если при фильтрации ложных пиков учитывать все вышеперечисленные формализованные параметры. Такой метод фильтрации ложных пиков снижает вероятность появления ошибок первого рода.

На точности определения места течи сказывается выбор метода обработки дефектоскопического сигнала. В общем, дефектоскопический сигнал принимает форму пика, который состоит из переднего и заднего фронта.

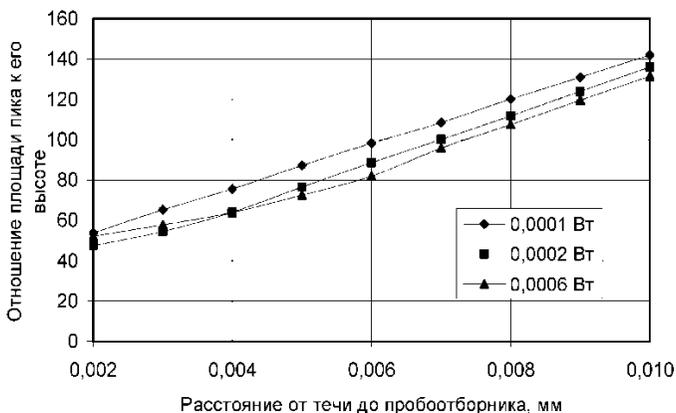


Рис. 1. Зависимость отношения дефектоскопического сигнала площади к высоте от расстояния траектории пробоотборника до течи

Сопоставлений результатов измерений площади пика в пределах переднего и заднего фронта установлено, что разброс показаний по заднему фронту в полтора раза больше, чем для переднего. Причина этого явления объясняется тем, что продолжительность нарастания дефектоскопического сигнала переднего фронта в 3–4 раза меньше. В результате, за длительный промежуток измерения увеличивается доля вклада фоновый компонента, изменяющегося во времени по случайному характеру. Вторая причина обусловлена разбросом скорости снижения дефектоскопического сигнала на участке заднего фронта. Несмотря на то, что природа этого явления хотя и подлежит формальному описанию, но из-за сложного характера зависимости ее трудно реализовать в алгоритме обработки дефектоскопической информации.

Секция № 13. КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ НК

Руководители секции: Журавлев О.А., Иванов В.И.

МНОГОПАРАМЕТРОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИЙ И ОБЪЕКТОВ

Крайний В.И., Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е.

*ООО «Технологический институт энергетических
обследований, диагностики и неразрушающего
контроля «ВЕМО», Москва, Россия*

В докладе рассматривается системный подход к исследованию технического состояния материалов, конструкций и объектов с помощью методов неразрушающего контроля с использованием комплексирования измерительных устройств и проведения наблюдений во времени (накопления информации) для повышения качества и надежности обнаружения дефектов и повреждений.

Основными тенденциями обследования объектов с целью определения дефектов, повреждений и аномалий являются повышение точности определения дефектов, глубин обследования, усложнение решаемых задач. Наличие многих методов неразрушающего контроля (НК) не случайно: оно свидетельствует об отсутствии универсальных методов. Часто только рациональный выбор их комплексов позволяет достичь требуемого результата при неразрушающем контроле.

Под комплексированием устройств НК понимается их объединение в комплексную систему, осуществляющую совместную обработку информации и обеспечивающую повышение точности, помехозащищенности и надежности.

Необходимость комплексирования методов обусловлена тем, что многие из них, во-первых, некорректны: малым изменениям сигналов от аномалий, дефектов и повреждений могут соответствовать большие изменения их физико-геометрических параметров. Эта закономерность известна как принцип эквивалентности [1].

Во-вторых, по мере увеличения глубины обнаружения дефектов уменьшается отношения величины сигнала к уровню помех. В результате, несмотря на совершенствование методов, отношение сигнал/помеха увеличивается мало. По этим причинам определение параметров дефектов оказывается затрудненным, неоднозначным и недостоверным. Для уменьше-

ния некорректности необходимо применение ряда методов с разными физическими основами.

Комплексирование устройств НК можно классифицировать на следующие виды:

- по информации на входе устройств;
- по информации на выходе устройств.

При комплексировании по информации на входе устройств система комплексирования синтезируется на основе обработки сигналов, полученных в зоне дефекта, и представляет из себя векторный процесс на входе устройств. Такой подход позволяет получать максимальное количество информации из наблюдаемого процесса.

При комплексировании по информации на выходе устройств используется векторный процесс на выходе устройств после обработки. Такая система синтезируется с учетом ограничений, накладываемых использованием конкретных устройств, качество обработки информации в этом случае может быть ниже, чем в первом случае. Тем не менее, комплексирование по информации на выходе устройств целесообразно, так как позволяет синтезировать оптимальную или квазиоптимальную систему с учетом тех устройств, которые производятся или уже имеются в наличии.

Общую задачу комплексирования устройств с целью обнаружения дефектов можно сформулировать следующим образом.

Пусть имеется l разных устройств, производящих обнаружение одного и того же дефекта. Рассмотрим задачу их оптимального комплексирования в двух вариантах: по информации на входе и выходе этих устройств.

При комплексировании по информации на входе наблюдаемый процесс y_{it} можно задать в общем виде

$$y_{it} = \vartheta s_{it} + \eta_{it} + \xi_{it}; \quad \vartheta = 0,1; \quad 0 \leq t \leq T; \quad i = 1, \dots, l,$$

где $s_{it}, \eta_{it}, \xi_{it}$ – полезный сигнал, внешняя помеха и собственный шум i -го устройства соответственно. Поскольку устройства в общем случае имеют разные физические принципы работы, то все сигналы на входах устройств будут разными, даже если они получены от одного дефекта, при этом некоторые сигналы могут отсутствовать $s_{jt} = 0, 0 \leq t \leq T$, если соответствующие устройства не обнаружили дефект.

Если распределения вероятностей сигналов, помех и шумов известны, то тогда задача обнаружения сводится к проверке гипотезы $\vartheta = 1$ при альтернативе $\vartheta = 0$. Оптимальное решение находится по критерию отношения правдоподобия

$$\Lambda(y) \equiv \frac{w(y|1)}{w(y|0)} \geq h,$$

где $w(y|1)$ и $w(y|0)$ – плотности вероятности наблюдаемого случайного процесса при наличии и отсутствии дефекта соответственно.

При использовании критерия Неймана-Пирсона порог h определяется заданной вероятностью ложной тревоги (ошибки второго рода).

Однако такая система может оказаться сложной, так как ее реализация связана с передачей между устройствами и обработкой в ПК или вычислителе большого объема информации.

Гораздо проще реализуется система во втором случае – с комплексированием информации на выходе устройств. В этом случае каждое из устройств решает задачу обнаружения дефекта независимо друг от друга, а комплексирование осуществляется путем совместной обработки выходных данных устройств, т.е. результатов их решений о наличии или об отсутствии дефекта. Решение по-прежнему принимается на основе использования отношения правдоподобия, с той разницей, что для его вычисления используются не сигналы (например, отраженные) от дефектов как в предыдущем случае, а решения устройств.

Пусть i -е устройство ($i = 1, \dots, l$), реализующее некоторую решающую функцию $\delta_i(\cdot)$, в результате наблюдения на отрезке $[0, T]$ процесса y_{it} принимает решение $\delta_i(y_{i0}^T) = 1$ о наличии сигнала и решение $\delta_i(y_{i0}^T) = 0$ об его отсутствии с вероятностями правильного обнаружения D_i и ложной тревоги F_i .

Для повышения качества и надежности обнаружения дефектов и повреждений объектов, при низком отношении сигнал-шум (малый размер дефекта, большая глубина его расположения) необходимо использовать наблюдения (накопление информации) во времени. В этом случае на выходах устройств имеем случайный вектор $\delta_1, \dots, \delta_l$, компоненты которого принимают значения 0 или 1 с вероятностями

$$P(\delta_i = 1 | \vartheta = 1) = D_i, \quad P(\delta_i = 0 | \vartheta = 1) = 1 - D_i,$$

$$P(\delta_i = 1 | \vartheta = 0) = F_i, \quad P(\delta_i = 0 | \vartheta = 0) = 1 - F_i. \quad (1)$$

По критерию отношения правдоподобия по наблюдениям $\delta_1, \dots, \delta_l$ выносится решение d_1 о наличии дефекта или d_0 об его отсутствии в соответствии с правилом

$$\Lambda_l \equiv \frac{P(\delta_1, \dots, \delta_l | \vartheta = 1)}{P(\delta_1, \dots, \delta_l | \vartheta = 0)} \geq h_l.$$

Конкретизируя отношение правдоподобия Λ_l с учетом (1) и статистической независимости δ_i по i можно получить [3]

$$\sum_{i=1}^l \delta_i \ln \left[\frac{D_i(1-F_i)}{F_i(1-D_i)} \right] \geq h. \quad (2)$$

Этот алгоритм дает решение задачи оптимального комплексирования измерительных устройств с использованием их выходной информации.

Согласно (2) решения $\delta_i = 1$, формируемые устройствами, суммируются с весами $\mu_i = \ln[D_i(1-F_i)/F_i(1-D_i)]$.

Если вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги измерительных устройств одинаковы, т.е. $D_i = D$, $F_i = F$, $i = 1, \dots, l$, то весовые коэффициенты становятся одинаковыми $\mu_i = \mu$ и их можно опустить без потери оптимальности. Порог h выбирается по вероятности ложной тревоги F_c (ошибке второго рода), заданной для системы измерительных устройств (критерий Неймана-Пирсона). Синтезированная система по принципу действия аналогична бинарному накопителю, подсчитывающему число единиц и сравнивающему накопленную величину с порогом. Величина (2) в этом случае имеет биномиальное распределение вероятностей. Характеристики обнаружения системы D_c, F_c рассчитываются аналогично характеристикам одного устройства [2]:

$$D_c = \sum_{m=h}^l C_l^m D^m (1-D)^{l-m},$$

где $C_l^m = l!/[m!(l-m)!]$ – число сочетаний из l по m , а порог h – наибольшее целое число, удовлетворяющее неравенству

$$F_c \leq \sum_{m=h}^l C_l^m F^m (1-F)^{l-m}.$$

Как показано в [2], в результате описанного комплексирования l устройств отношение сигнал- шум увеличивается по сравнению с отношением сигнал- шум на выходе одного устройства (для устройств с оптимальной обработкой сигналов в l раз, если все устройства одинаковы). При этом уменьшаются ошибки измерения параметров дефектов, что приводит к повышению качества и достоверности их оценки комплексной системой измерительных устройств.

В целом эффективность того или иного метода определяется: природой физического процесса, наличием экранирующих включений с резко

контрастными свойствами, а также неоднородностью среды, создающей помехи, интенсивностью помех, влияющих на величину $\sigma_{\text{фон}}$, и другими факторами.

Задача в общем плане сводится к математическому или физическому моделированию прямых и обратных задач для разных классов физических моделей. Наиболее распространенным классом являются одномерные модели, в которых физические свойства меняются в одном направлении, например, с глубиной. Это типично для однослойных или многослойных объектов. Основными инструментальными методами изучения таких объектов являются: тепловизионные, с помощью ультразвуковых, электромагнитных, акустических, упругих волн и др.

Для выделения труднообнаруживаемых (малых, глубокорасположенных) дефектов можно использовать различные методы: распознавание образов, дискриминантный, кластерный, факторный и другие виды анализа. Сущность их сводится к изучению сигналов, полученных от известных дефектов на этапах обучения. При исследовании используются математические методы оценки признаков таких дефектов. При проведении обследования объекта эти признаки используются при распознавании обнаруженных аномалий, которые могут быть потенциальными дефектами.

Количественная интерпретация данных может быть пометодной и совместной. Пометодная интерпретация комплексных данных сводится к определению характеристик дефектов обследуемых объектов путем решения обратных задач для разных методов. Совместное решение обратных задач для нескольких методов реализуется путем использования методов многомерной статистики, например, получение уравнения многомерной регрессии. Для этого с использованием наблюдений, рассчитываются те или иные физические и геометрические параметры y_i , выражаемые численно.

Для тех же объектов определяются физические параметры x_i , получаемые наиболее точно, т.е. на которые принцип эквивалентности действует наименьшим образом. В ходе обработки результатов измерений на этапе обучения используется формула многомерной линейной регрессии:

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^l a_i x_i, \quad (3)$$

где $a_0 = y_{jcp} - \sum a_i x_{i,cp}$, $a_i = b_i \frac{\sigma_{yj}}{\sigma_{\xi}}$.

Здесь y_j – параметр, определяемый по l методам x_1, x_2, \dots, x_l , a_0 – свободный член; a_i – коэффициенты регрессии, значения $x_{i,cp}, y_{jcp}, \sigma_{xi}, \sigma_{yj}$ рассчитываются по формуле (6); b_i – вспомогательные коэффициенты, получаемые при решении системы линейных уравнений

множественной регрессии; $r_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^l b_i r_{iy}}$ – множественный коэффициент корреляции; r_{iy} – коэффициент парной корреляции между y_j и x_i (3).

На базе ООО «Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» осуществлена организация и освоение мелкосерийного производства разработанных аппаратно-программных и методических средств комплексной диагностики технического состояния и оценки эксплуатационной безопасности транспортных тоннелей, зданий и сооружений.

Мелкосерийный образец комплекса демонстрировался на «X Московском международном салоне инноваций и инвестиций» (7–10 сентября 2010 г., Москва, ВК Гостиный двор) и удостоен Золотой медали.

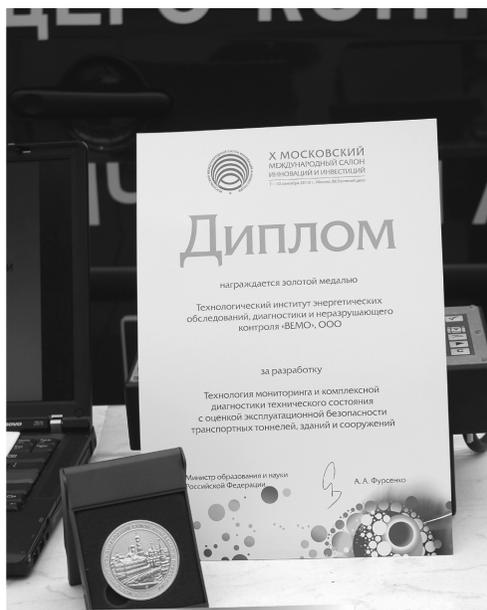


Рис. 1. Золотая медаль и Диплом X Салона инноваций
Список литературы

1. **Хмелевской В.К.** Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 1. Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1997.
2. **Сосулин Ю.Г.** Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. 304 с.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Тарабрин В.Ф.

ЗАО «Фирма ТВЕМА», Москва, Россия

Среди технологий, необходимых для инновационного развития железнодорожного транспорта, особое место отводится передовым решениям в сфере диагностики объектов железнодорожной инфраструктуры, которые обеспечивают безопасность движения поездов на железных дорогах России. Целью диагностики является своевременное выявление расстройств, угрожающих безопасности движения, нарушающих установленный ход перевозочного процесса или требующих неотложных или плановых профилактических работ.

Существующая система диагностики не отвечает современным требованиям, так как она не имеет единой базы данных и не позволяет оценить как текущее состояние инфраструктуры, так и его изменение во времени с целью прогнозирования состояния и эффективного планирования работ по содержанию, реконструкции и ремонту путевого хозяйства с минимальными затратами. При контроле состояния технических объектов, прежде всего на линиях высокоскоростного, скоростного и тяжеловесного движения, не обеспечивается достоверная комплексная информация. Технология и применяемые методы и системы диагностики имеют низкую производительность, эффективность и достоверность при контроле инженерных сооружений (мосты, туннели), габаритов приближения строений, междупутного расстояния, снятия профиля и плана пути, низкий уровень автоматизации и сервисных функций диагностической техники, компенсированный расширением обслуживающего персонала. Применяется большое число типов средств диагностики, включая ручные, требующие значительных расходов на их эксплуатацию, в эксплуатации находится около 50 % съемных и самоходных мобильных средств диагностики, которые выработали свой ресурс.

В связи с этим ставится задача модернизации системы диагностики Российских железных дорог на основе внедрения принципиально новых комплексных систем диагностики, автоматизации процессов анализа, прогнозирования и управления, позволяющих минимизировать влияние человеческого фактора при принятии решений, связанных с безопасностью движения. Комплексный подход в оценке состояния объектов инфраструктуры позволит также снизить затраты на содержание и ремонт пути как за счет сокращения плановых поездок диагностических средств, так и благодаря технологии оценки на основе мониторинга и прогнозирования состоя-

ния рельсового пути, балластной призмы, инженерных сооружений, контактной сети и др.

В докладе представлена концепция комплексирования методов и систем неразрушающего контроля и технической диагностики железнодорожной инфраструктуры, рассматриваются принципы проектирования, производства и эксплуатации отвечающих современным требованиям диагностических комплексов.

В качестве примера реализации концепции комплексирования методов и систем диагностирования железнодорожной инфраструктуры приводится диагностический комплекс «ИНТЕГРАЛ», созданный на основе новейших технологий и объединяющий множество подсистем контроля, позволяющих измерять и обрабатывать более ста параметров состояния пути. Комплекс обеспечивает проверку всех входящих в железнодорожную инфраструктуру объектов – пути и сооружений, автоматики и телемеханики, электрификации и электроснабжения, связи. Диагностический комплекс «ИНТЕГРАЛ» заменяет сразу 7 диагностических лабораторий, таких как вагон-дефектоскоп, вагон-путеизмеритель, скоростная путеобследовательская станция, тоннелеобследовательская станция, вагон контроля параметров контактной сети, вагон контроля параметров средств железнодорожной автоматики и телемеханики, вагон контроля параметров радиосвязи. Комплекс оборудован автоматизированной системой георадиолокации земляного полотна и системой визуального обнаружения дефектов, не имеющих аналогов на железных дорогах России и стран СНГ. Все полученные данные синхронизируются по единым географической и путевой координатам. Интегрированная в единый комплекс диагностика позволяет не только повысить качество проверок, но и экономить необходимые для их проведения ресурсы.

ПОИСК УТЕЧЕК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ПОДЗЕМНЫХ ТЕПЛОТРАССАХ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Коннов В.В., Чикалов С.Л., Коннов Вл.Вл.,
Безгодов С.И., Коннов А.В.,
ЗАО НПЦ «МОЛНИЯ», Москва, Россия

Теплоснабжение такой северной страны, как Россия, должно относиться к числу важнейших приоритетов государственной экономической и энергетической политики. Суровые климатические условия в России предопределяют теплоснабжение как наиболее социально значимый и в то же время наиболее топливоемкий сектор экономики: в нем потребляется примерно 40 % энергоресурсов, используемых в стране, а более половины этих ресурсов приходится на коммунально-бытовой сектор [1].

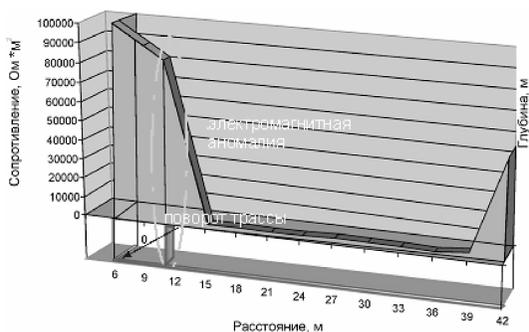


Диаграмма 1. Распределение сопротивления вдоль линии прямой подачи теплоносителя

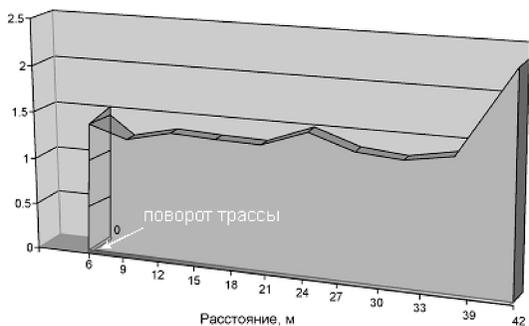


Диаграмма 2. Глубина залегания линии прямой подачи теплоносителя

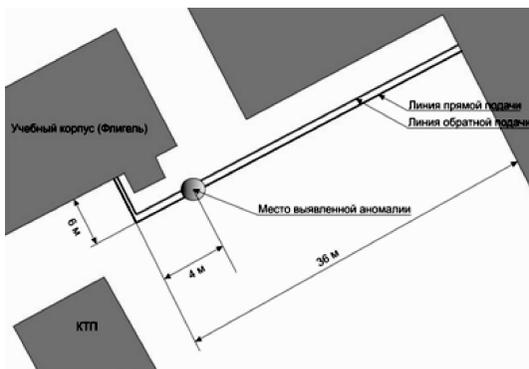


Диаграмма 3. Схема теплотрассы с привязкой на местности



Фотография 1. Фотоизображение теплотрассы с привязкой на местности

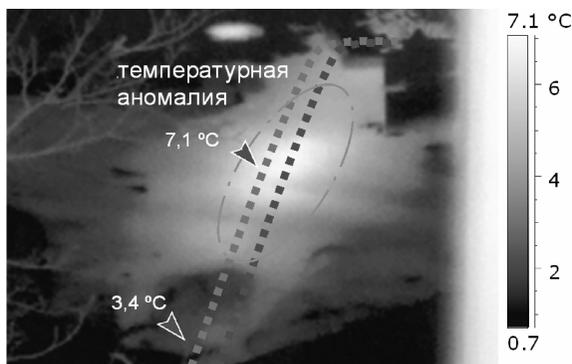
Количественные и качественные характеристики современного состояния тепловых сетей «Мосэнерго» достигли таких величин, что существующие технологические, организационные и экономические возможности предприятия с трудом обеспечивают управляемость процессом централизованного теплоснабжения Москвы [2].

В системе промышленных трубопроводов городского хозяйства наиболее сложными для диагностики являются теплотрассы по нескольким причинам:

- износ теплотрасс, введенных в эксплуатацию в 60–70 годах, многократно превысил допустимые нормы;
- разрушение бетонных коробов и, как следствие, деградация теплоизоляции, способствующая коррозии тела трубы;
- утрата проектно-исполнительной документации (схем прокладки) и поиск объектов на фоне мешающих факторов от других коммуникаций.

Преодолеть эти технически сложные препятствия позволяет комплексный подход к решению поставленной задачи. С этой целью было предложено сочетать электрометрический, магнитометрический и тепловой методы контроля. НПЦ «Молния» разработал приборный комплекс «М-1» для бесконтактного диагностирования трубопроводов с использованием электрометрического и магнитометрического методов. Электрометрический метод позволяет провести картографирование токов в трубопроводе (диаграмма 1), определить ось и глубину залегания, а также местоположение на трассе с возможностью привязки к географическим координатам трубопровода (диаграммы 2–3).

Тепловой метод позволяет зафиксировать распределение температурного поля вдоль трубопровода (фотография 1; термограмма 1–2).



Термограмма 1



Термограмма 2

Комплексная методика поиска утечек опробована на участке тепло-трассы протяженностью 42 метра, вид теплоносителя – вода, способ прокладки – подземный (в непроходимом канале), дата обследования - февраль 2011 г.

По результатам токовой топографии и распределения сопротивления растеканию тока выявлено место электромагнитной аномалии с центром на расстоянии 10 м от начала участка. Электромагнитная аномалия выявлена как на прямой, так и на обратной линии подачи теплоносителя. По результатам тепловизионного обследования была выявлена температурная аномалия с центром на расстоянии 10 м от начала участка. Шурфовое обследование подтвердило сквозные повреждения тела трубы на прямой и обратной линии подачи теплоносителя. В работе использовались: приборный комплекс «М-1» и тепловизор FLIR P-660.

Проведенное обследование показывает, что предлагаемая методика может использоваться при поиске утечек и оценке состояния подземных трубопроводов теплотрасс.

Литература

1. **Извлечения** из Энергетической стратегии России на период до 2020 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 г М 1234-р).

2. **Липовских В.М.** Основные направления энергоэффективности при эксплуатации тепловых сетей. «Энергосбережение», 1999. № 1. 10 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Горкунов Э.С., Владимиров А.П., Задворкин С.М.
Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В механике и неразрушающей диагностике успешно применяются различные методы лазерной интерферометрии, в том числе спекл-интерферометрические методы. В ИМАШ УрО РАН развиваются две методики, базирующиеся на использовании динамического варианта спекл-интерферометрии. Первая методика основана на интерференции двух спекл-полей и позволяет определять макроскопические относительные перемещения двух участков поверхности. В настоящее время она используется для бесконтактного определения скорости поверхностной акустической волны Релея в различных материалах. Вторая методика позволяет по особенностям «кипения» спеклов изучать микро-деформации на локальных участках поверхности объектов. Целью доклада является ознакомление коллег с возможностями методов для изучения деградации углеродистых сталей при их пластической деформации и многоциклового усталости.

Создана экспериментальная установка, позволяющая освещать два малых участка шероховатой поверхности и регистрировать смещения участков при прохождении через них ультразвуковой волны Релея. Разработаны два варианта методики: для измерения скорости волны Релея на базах более 7 мм и на базе около 1 мм. Возможности установки апробированы на сталях, подвергнутых термической обработке и пластической деформации. Обнаружена хорошая корреляция между микро-искажениями кристаллической решетки и скоростью волны Релея.

Создана установка для усталостных испытаний знакопеременным консольным изгибом. Установка оснащена лазерным модулем и телекамерой для регистрации кадров динамики спеклов на заданной фазе колебания объекта. На установке проведены испытания углеродистой стали в услови-

ях многоциклового усталости. Кроме регистрации фильмов динамики спеклов, до испытания и после каждой серии по 90–100 тысяч циклов, в области максимального напряжения определяли макроскопические остаточные напряжения, степень искажения кристаллической решетки, скорость ультразвуковой волны Релея, регистрировали статическую петлю магнитного гистерезиса. Кроме того, путем сканирования по всей длине образца, регистрировали сигналы вихретокового прибора, определяли тангенциальную составляющую остаточного магнитного потока. В рабочей части образца на базах 15 и 20 мм соответственно определяли электрическое сопротивление, регистрировали петлю магнитного гистерезиса. Анализ данных, обработанных после 1050000 циклов, показал следующее. На поверхности образца отсутствуют макро- и микротрещины. Методиками, чувствительными к деградации материала при усталости, являются: вихретоковый метод, спекл-интерферометрия, рентгеновский метод определения напряжений и ультразвуковой метод. Получены картины областей равных корреляций оптических сигналов, демонстрирующие появление и развитие участков, в которых при циклическом нагружении возникают необратимые микроскопические смещения малых участков поверхности. Показано, что если какой-либо кадр взять за начало отсчета, то необратимые изменения в картине спеклов начинаются после 30–50 циклов нагружения, изучена эволюция средних значений коэффициентов корреляции сигналов и временного контраста спеклов. На модели тонкого поверхностного слоя материала, по значениям остаточных напряжений оценены относительные изменения плотности материала. Предложена методика контроля деградации поверхностного слоя образца по накопленным значениям средних величин коэффициентов корреляции сигналов или временного контраста спеклов.

Работа выполнена при частичной поддержке совместного проекта № 09-С-1-1002 ИМАШ УрО РАН с НАН Беларуси и проекта ОЭММПУ РАН № 09-Т-1-1002.

УЧЕТ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ (ЗТВ) СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАГНИТНО- ВИХРЕТОКОВОМУ КОНТРОЛЮ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Шубочкин А.Е., Ефимов А.Г.

ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

Проблемы техногенной безопасности заслуживают постоянного внимания и усовершенствования средств и методов неразрушающего контроля. Магистральные трубопроводы, используемые в нефтяной и газовой промышленности, не только оказывают незаменимую роль в экономике нашей страны, ее развитии и процветание, но являясь сложными техногенными объектами, остаются постоянным источником экологической опасно-

сти. Ежегодные крупные аварии приносят колоссальный урон среде и экономике. В настоящее время средний срок эксплуатации 30 % газопроводов превысил тридцатилетний рубеж. Общее устаревание магистральных трубопроводов при их протяженности более 200 тыс. км, влечет за собой огромное количество работы для своевременного контроля их состояния. К нефтегазопроводам относятся стальные электросварные прямошовные и спиралевидные трубы диаметром от 530 до 1500 мм. Толщина стенки трубы от 8 до 25 мм. Наибольшее распространение имеют прямошовные трубы с одним или двумя сварными соединениями. Пришовные области являются концентраторами напряжений, и практика эксплуатации показала, что максимальное число стресскоррозионных поражений выявляются именно в пришовной зоне с нижней стороны трубы.

Расчет поля шва рассмотрен в работах [1, 2], однако он выполнен без учета размагничивающего фактора шва, только для линейного случая, а поле рассчитывалось непосредственно на поверхности сварного изделия. Интерес же представляет изменение поля на некотором расстоянии от поверхности. В работах [3, 4] авторами рассматриваются линейные модели сварного шва, для случая идентичности магнитных свойств материалов шва и трубы. В них определяется влияние геометрии шва на искажение магнитного поля над поверхностью. В продолжении исследования авторы моделируют изменение магнитной проницаемости по высоте сварного шва в широких пределах, чем определяют наличие включений и непроваров в теле сварного шва. Однако представленная авторами модель не учитывает изменение структуры металла, вызванного разупрочнением в результате воздействия термического цикла сварки. Реальная зона искажения магнитной проницаемости отличается от габаритов самого шва.

Сварные соединения, выполненные сваркой плавлением, можно разделить на несколько зон (зона сварного шва, зона сплавления, зона термического влияния, основной металл), отличающихся магнитной проницаемостью. Для моделирования процесса контроля и учета влияния неоднородности магнитных свойств пришовной области на магнитно-вихретоковый контроль использовался метод конечных элементов (МКЭ). Для практической реализации МКЭ использовался программный пакет ANSYS. Алгоритм, учитывающий влияние неоднородности магнитного поля вызванного присутствием в области контроля сварного шва, реализован в программной части магнитно-вихретокового дефектоскопа ВД-90НП, а так же в системе многотачкового вихретокового дефектоскопа ВД-91НМ.

Литература

1. Шарова А.М., Новиков В.А. Топография поля дефекта на поверхности сварного шва. Дефектоскопия, 1981, № 5. С. 71–78.
2. Шур М.Л., Ваулин С.Л., Щербинин В.Е. Теоретическое и экспериментальное исследование тангенциальной составляющей поля валика усиления сварного шва. – Дефектоскопия, 1981, № 10. С. 59–71.

3. Реутов Ю.Я., Лоскутов В.Е., Гобов Ю.Л., Ваулин С.Л. Магнитное поле кольцевого стыкового шва магистрального газопровода. Дефектоскопия, № 11. 2003. С. 51–61.

4. Канайкин В.А. Развитие теории и разработка высокоэффективных методов, средств и технологии внутритрубной дефектоскопии магистральных газопроводов для обеспечения их безаварийной эксплуатации. Докторская диссертация, 2011.

ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА УПРУГИЕ МОДУЛИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ

Подымова Н.Б.¹, Карабутов А.А.¹, Кобелева Л.И.², Чернышова Т.А.²
¹*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия;*
²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

Проблема неразрушающего контроля конструкционных материалов по фактическому состоянию является весьма актуальной, поскольку дефекты и изменения структуры материала, возникающие при изготовлении и в процессе эксплуатации изделий, могут существенно уменьшить их прочность. Механические свойства материала (например, упругие модули) несут ценную информацию для определения остаточного ресурса детали или изделия. В процессе старения уменьшение упругих модулей может составлять 15...20 % [1], в частности, это может возникать из-за возрастающей пористости материала.

В настоящей работе проведена количественная оценка влияния пористости на локальные упругие модули образцов изотропных композиционных материалов на базе сплава $AK12M2MzH$, упрочненных частицами карбида кремния SiC со средним диаметром 14 мкм в различной концентрации. Экспериментальное определение упругих модулей проводилось лазерным оптико-акустическим методом [2], основанным на лазерном термооптическом механизме возбуждения ультразвука и измерении фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн в образцах в спектральном диапазоне 0,5...50 МГц. Его основное преимущество перед традиционными ультразвуковыми методиками заключается в возможности эффективного возбуждения коротких и мощных зондирующих импульсов, необходимых для диагностики сильно поглощающих ультразвук неоднородных композиционных материалов. В предложенном методе толщина исследуемых образцов может составлять 0,1...70 мм, локальность измерений в поперечном направлении 1...2 мм, максимальная относительная погрешность определения модуля Юнга составляет 6 %, модуля сдвига – 4 %, коэффициента Пуассона – 5 %.

Объемная концентрация воздушных пор (пористость) образца P , усредненная по всему его объему, определяется по формуле:

$$P = (1 - \rho / \rho_0) \cdot 100\% , \quad (1)$$

где расчетная плотность образца ρ_0 определяется по известной плотности наполнителя SiC : $\rho_{SiC} = 3,2 \times 10^3$ кг/м³, расчетной плотности матрицы – сплава $AK12M2MzH$: $\rho_{AK} = 2,735 \times 10^3$ кг/м³ и по известным массовым концентрациям матрицы $n_{m(AK)}$ и наполнителя $n_{m(SiC)}$:

$$\rho_0 = \frac{\rho_{AK} \rho_{SiC}}{n_{m(AK)} \rho_{SiC} + n_{m(SiC)} \rho_{AK}} . \quad (2)$$

Реальная плотность образца ρ определяется по результатам измерения объема и взвешивания образцов в воздухе. Все образцы представляли собой плоскопараллельные шлифованные диски диаметром 25 мм. Параметры образцов приведены в таблице ниже:

№ образца	Толщина H , мм	Массовая концентрация компонентов n_m		Расчетная плотность $\rho_0, \times 10^3$ кг/м ³	Измеренная плотность $\rho, \times 10^3$ кг/м ³	Усредненная пористость $P, \%$
		$AK12M2MzH$	SiC			
171	10,70	1,000	0,000	2,735	2,714	0,8
172	10,18	0,962	0,038	2,750	2,710	1,45
173	10,98	0,923	0,077	2,766	2,665	3,65
174	4,72	0,845	0,155	2,798	2,660	4,93

Как видно, с ростом концентрации наполнителя SiC пористость образцов возрастает.

Расчет теоретических значений модуля Юнга E_0 , модуля сдвига G_0 и коэффициента Пуассона ν_0 для образцов производится по формулам:

$$E_0 = \rho_0 c_s^2 \left[\frac{3c_{l_0}^2 - 4c_s^2}{c_{l_0}^2 - c_s^2} \right] , \quad (3)$$

$$G_0 = \rho_0 c_s^2 , \quad (4)$$

$$\nu_0 = \left[\frac{c_{l_0}^2 - 2c_s^2}{2c_{l_0}^2 - 2c_s^2} \right] , \quad (5)$$

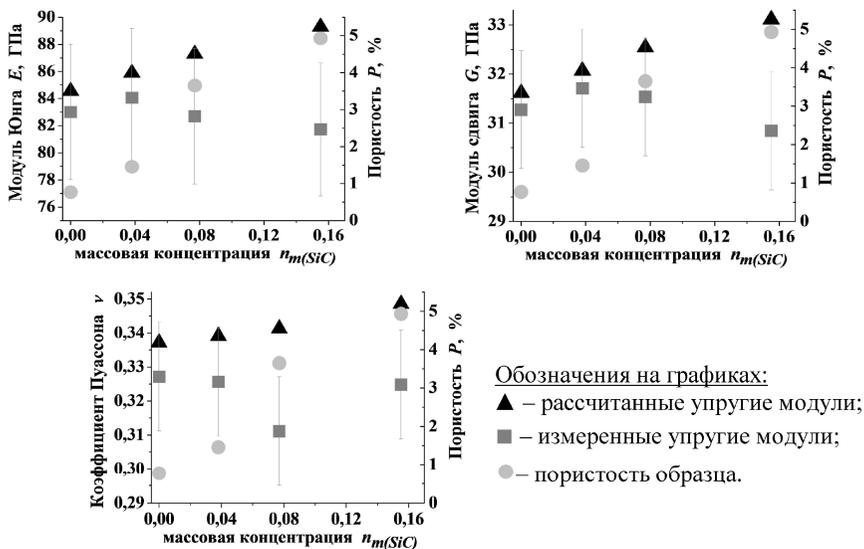


Рис. 5

где ρ_0 – расчетное значение плотности образца (см. (2)); c_{l_0} – расчетное значение фазовой скорости продольных акустических волн в образце (с использованием модели двухфазной среды [3]); c_s – измеренное значение скорости сдвиговых акустических волн в образце. Для расчета упругих модулей берется именно значение c_s , поскольку наличие воздушных пор не влияет на сдвиговую жесткость образца и скорость сдвиговых волн возрастает с ростом концентрации SiC .

Фактические значения упругих модулей исследованных образцов вычисляются по формулам (3)–(5) с заменой ρ_0 и c_{l_0} на измеренные значения плотности ρ и скорости продольных акустических волн c_l для каждого образца. Результаты измерений и теоретических расчетов представлены на рисунке. Видно, что теоретические значения упругих модулей возрастают с ростом концентрации SiC , однако при этом растет и пористость материала, что приводит к эффективному уменьшению фактических упругих модулей.

Таким образом, для обеспечения эффективного возрастания упругих модулей композита на основе матрицы из сплава $AK12M2MgH$ при добавлении упрочняющих частиц SiC возникающая пористость не должна превышать 2...2,5 %.

Литература

1. **Прикладная** механика композитов (под ред. Тарнопольского Ю.М.). М.: Мир, 1989. 358 с.
2. **Карабутов А.А., Кобелева Л.И.** и др. // Заводская лаборатория. 2009. Т. 75. № 3. С. 27–33.
3. **Жаркий С.М., Карабутов А.А.** и др. // ФТП. 2003. Т. 32. № 10. С. 485–489.

ДИАГНОСТИКА ТРЕЩИН В РОТОРНЫХ ДИСКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН МЕТОДАМИ ЦВЕТНОЙ, МАГНИТОПОРОШКОВОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Шмелев Н.Г.¹, Крюков И.И.²

¹ЗАО «НПФ «Невинтермаш», Санкт-Петербург, Россия,

²ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия

Доклад посвящен особенностям диагностики дисков газовых турбин газоперекачивающих агрегатов методами цветной (ЦД), магнитопорошковой (МПД) ультразвуковой (УЗД) дефектоскопии. При этом показана эффективность обнаружения дефектов типа трещин в дисках ТВД и ТНД под первым зубом елочных пазов дисков в районе трапецеидальных проточек под стопорные пластинки.

При обследовании газоперекачивающих агрегатов типа ГТК-10-4 с наработкой более 100 тысяч часов особое внимание уделяется техническому состоянию дисков роторов турбин высокого (ТВД) и низкого давления

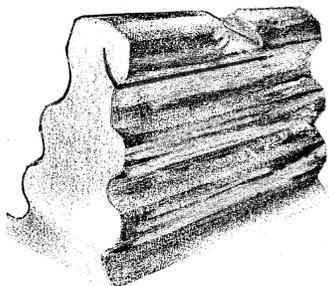


Рис. 1. Диск с трещинами в елочных пазах

(ТНД). Гребни дисков турбин ТВД и ТНД агрегатов ГТК-10-4 в зоне межпазовых выступов елочных хвостовых соединений дисков с рабочими лопатками являются самыми термонапряженными элементами ГТУ, в которых при эксплуатации достаточно часто появляются трещины [1].

При этом наиболее распространенными (более 95 % из всего количества обнаруживаемых) являются трещины в замковых выступах дисков, выполненных со стопорным пазом, расположенные под первым зубом в зоне стопорного паза и ориентированные вдоль оси диска (рис. 1).

Широко применяется для выявления таких дефектов капиллярная ЦД, обеспечивающая обнаружение достаточно раскрытых трещин. При применении капиллярной цветной дефектоскопии только вначале индикаторный след по очертаниям близок форме дефекта, в дальнейшем за счет дополнительного извлечения пенетранта из полости трещины цветной след расширяется до 10–20 и более раз по сравнению с шириной реального дефекта, что и позволяет обнаруживать дефекты с раскрытием более 1 мкм.

Также широко применяется при диагностике трещин метод МПД. При этом черный на белом индикаторный след после намагничивания хотя и несколько превышает ширину трещины, но по очертаниям всегда близок форме реального дефекта. При этом МПД менее критична к «чистоте» полостей дефектов и качеству подготовки поверхности и обеспечивает надежное выявление трещин.

Большим преимуществом использования методов ЦД и МПД является то, что они позволяют контролировать объекты сложных форм, какими являются внутренние поверхности елочных пазов во впадинах под первым зубом межпазового выступа и поверхности трапецеидальной проточки под стопорную пластинку.

Недостатком использования метода ЦД является высокая трудоемкость подготовки внутренних поверхностей дисков под цветную дефектоскопию, а также проведения самой дефектоскопии из-за сложной формы поверхности изделия. Недостатком использования метода МПД является необходимость после проведения контроля размагничивания контролируемых зон диска, что не всегда реализуемо, особенно в условиях газоконпрессорных станций.

Метод УЗД применяется для выявления трещин, расположенных в дисках под первым зубом елочного паза под трапецеидальной проточкой. Так как минимальная ширина трапецеидальной проточки типа «ласточкин хвост» не превышает 8 мм, были использованы раздельно-совмещенные пьезопреобразователи (ПЭП) с частотой 5 МГц типа П112-5-3×4-В. В процесс УЗД раздельно-совмещенный ПЭП перемещается по поверхности трапецеидальной проточки, покрытой специальным гелем, так, чтобы разделительный экран преобразователя не доходил до края 1...1,5 мм. Трещины, как правило, расположены (зарождаются) на фигурной поверхности первого зуба на «глубине» от 3 до 4 мм от «донной» поверхности трапецеидаль-

ной проточки и развиваются в тело межпазового выступа, образуя вместе с фигурной поверхностью зуба отражатель, близкий к двухгранному углу. Величина угла зависит от «глубины» и места зарождения трещины и составляет 80...100°. Угол тем больше, чем меньше «глубина» трещины.

Признаком наличия недопустимого дефекта в гребнях диска при УЗД является появление на экране УЗ-дефектоскопа эхо-сигнала, превышающего уровень помех не менее чем на 6 дБ, на глубине 3...4 мм. Только в этих гребнях с зонами выявленных УЗ-индикаций производилась тщательная подготовка фигурной поверхности под первым зубом елочных пазов (устранение заусенцев, нагара, коррозионных отложений и грязи) и затем проводился уточняющий контроль методами ЦД или МПД, который уже окончательно подтверждал наличие и устанавливал протяженность трещин, обнаруженных ультразвуковым методом.

При такой комплексной проверке методами неразрушающего контроля (ЦД, МПД и УЗД) обеспечивается 100%-ное надежное выявление трещин в замковых пазах дисков без сколько-нибудь серьезных затрат на подготовку изделий к контролю, а сама процедура контроля всех замковых пазов диска ТВД или ТНД опытным дефектоскопистом не превышает 30 минут, даже с учетом фиксации выявленных трещин.

Литература

1. Крюков И.И., Рыбников А.И., Платонов В.С., Леонтьев С.А., Ковалев А.Г., Шмелев Н.Г., Андреев П.А., Мошников А.В. Диагностика трещин, образующихся в процессе эксплуатации в елочных пазах дисков газовых турбин ГТК-10-4 и ГТ-750-6, методами неразрушающего контроля. Труды ЦКТИ, 2009, вып. 296. С. 261 – 272.

КОМПЛЕКСНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК СУДОВ НЕФТЕФЛОТА

Иванов А.Н, Стеблев Ю.И., Пантеровский С.В.

СамГТУ, Самара, Россия

В докладе обобщаются результаты некоторых работ по дефектоскопии элементов силовых установок судов нефтефлота, проводимых испытательной лабораторией НК и ТД при Самарском отделении РОНКТД и СамГТУ. Лаборатория аккредитована Российским морским регистром судоходства и Российским речным регистром и имеет право выполнять работы по неразрушающему контролю (НК) и технической диагностике (ТД) изделий и конструкций номенклатуры объектов наблюдения указанных организаций.

Один из видов работ, проводимых испытательной лабораторией – дефектация поломанных элементов силовых установок (гребных валов, шатунов, крепежных элементов и т.п.) комплексом методов и средств неразрушающего контроля с анализом структуры слома и определением причин поломки.

При этом используются следующие методы НК: визуально-оптический, ультразвуковой, электромагнитный (вихретоковый и электропотенциальный), магнитопорошковый и механический – динамическая твердометрия. Эти методы реализуются следующим комплексом аппаратно-программных средств:

- вихретоковый дефектоскоп «Зонд ВД-96» с дополнительным выводом на переносной компьютер Note-Book для визуализации, обработки и документирования результатов контроля;
- электропотенциальный измеритель глубины трещин ИГТ-10НК;
- ультразвуковой дефектоскоп «УИУ-сканер» фирмы «АЛТЕС» с контрольными образцами (СОП) с искусственными отражателями – плоскодонными отверстиями;
- динамический твердомер ТЕМП-2 с выводом на Note-Book;
- магнитопорошковый дефектоскоп МД;
- средства визуально-оптического контроля: набор луп кратностью 2^{\times} , 3^{\times} , 5^{\times} , 7^{\times} , измерительные лупы 12^{\times} и 10^{\times} , приставной микроскоп типа МИ кратностью 30^{\times} , USB-микроскоп CY-800B, цифровой фотоаппарат типа Click Smart 510 (Logitech QuickCam for Notebooks Pro Webcam) с разрешающей способностью 640×480 пикс., сопряженный с микроскопом и компьютером, для обработки полученных изображений и документирования результатов контроля.

Испытания проводятся стандартными методами неразрушающего контроля [1], признанными и разрешенными к применению правилами Российского морского и речного регистров [2, 3]. При этом используются также методические рекомендации по диагностированию деградации и разрушения механических систем [4-7].

Результаты работ по дефектации и анализу поломок элементов судовых двигателей позволяет наметить пути идентификации и прогнозирования предельных состояний, предшествующих разрушению конструкции. Факт выхода из строя, поломки элемента говорит о том, что он достиг предельного состояния разрушения [5].

Анализ физико-механических характеристик и структуры металла в месте слома, полученные различными методами неразрушающего контроля и сравнение этих характеристик с данными на неповрежденной части элемента конструкции позволяет оценить степень деградации металла, определяющую предельное состояние разрушения.

Обработка статистических данных по дефектации и анализ причин поломок позволяет сформулировать рекомендации по прогнозированию

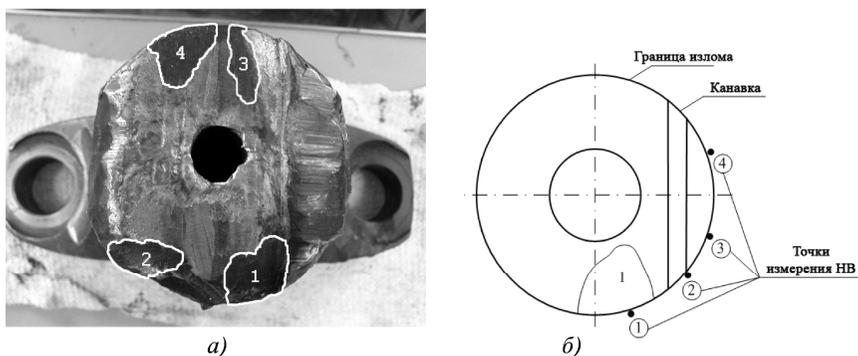


Рис. 1. Вид излома шатуна (а) и расположение точек измерения НВ относительно границ излома (б)

предельных состояний разрушения и предотвращению аварийных ситуаций технологического оборудования.

В докладе приводятся примеры дефектации различных элементов силовых установок судов: гребных валов, шатунов, крепежных элементов – болтов крепления демпфера коленвала судового дизеля.

В качестве примера приведены некоторые результаты дефектации фрагмента поломанного шатуна двигателя 8НФД48АЦ т/х «Волгонепть-107» (рис. 1).

В результате визуально-оптического контроля выявлены дефектные зоны в изломе шатуна 1, 2, 3, 4. Установлено наиболее вероятное их происхождение – это фрагменты приповерхностных трещин, возникших в упрочненном слое стержня шатуна под действием изгибных напряжений в верхней части шатуна, обращенной к коленчатому валу двигателя.

С помощью УЗК определены параметры упрочненного слоя стержня шатуна. Методом вихреговой компьютерной дефектоскопии проведено сканирование боковой поверхности шатуна – показано отсутствие трещин на боковой поверхности стержня.

Таблица 1

Точка измерения	1 Зона 1	2 Канавка (к)	3 Смещение вдоль (к)	4 Смещение вдоль (к)
НВ	217, 225, 239	251, 254, 257	285, 285. 291	235, 244. 247
НВ(ср)	227	254	287	242

Механические испытания – динамическая твердометрия излома стержня подтвердила наличие упрочненного слоя. А результаты измерения НВ (табл. 1) проводилась на цилиндрической поверхности стержня на расстоянии 10 мм от линии излома. Видно (табл. 1) значительное уменьшение твердости в зоне 1 (уменьшение прочности), что говорит об изменении структуры металла, потере прочности и признаке предельного состояния разрушения.

По результатам испытаний формируется мотивированное заключение о причинах поломки элемента силовой установки.

Литература

1. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н., Филинов и др.; под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 488 с., ил.
2. **Российский** Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов в 2-х томах. Т. 2. 2008 г.
3. **Правила** Российского Речного Регистра в 4-х томах. 2002 г.
4. **Справочник** машиностроителя. Под ред. Э.А. Сателя. – М.: Машиностроение, 1964. Т. 6.
5. **Берман А.Ф.** Дegradaция механических систем. Новосибирск: Наука. Сиб. Предприятие РАН, 1998. 320 с.
6. **Золотаревский В.С.** Механические испытания и свойства металлов. М. Металлургия, 1974. 304 с.
7. **Кондратьев Н.Н.** Отказы и дефекты судовых двигателей. – М.: Изд. Транспорт, 1985. 152 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ СРЕД И ОБЪЕКТОВ

Скворцов Б.В., Голикова М.И., Шатерников С.В.
СГАУ им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

Доклад посвящен математическому моделированию процесса распространения направленных акустических и электромагнитных импульсов, используемых для диагностирования состояния сред и объектов.

Импульсное зондирование широко известно и может применяться для исследования свойств сред и объектов [1]. Импульс есть сгусток энергии, которому можно приписать материальную массу. Импульсные сигналы, взаимодействующие с контролируемой средой или объектом неисчерпаемы по своим информационным и технологическим возможностям.

Зондирующий импульс любой физической природы и произвольной формы, действующий в какой-либо точке пространства в общем случае является вектором. Он исчерпывающим образом описывается комплексной спектральной амплитудой $S_U(j\omega)$, которая определяется как преобразование Фурье от исходного сигнала и представляет собой набор синусоидальных сигналов разной амплитуды и фазы. Любая среда, в которой распространяется и с которой взаимодействует импульс, характеризуется комплексным волновым вектором, компоненты которого целиком и полностью определяются свойствами объекта. В работе с общих позиций, математически описывается энергетическое поле, созданное излучающим импульсом при распространении его в контролируемой среде. Параметры данного поля в каждой точке несут информацию о свойствах объекта. Изменение амплитуды и спектрального состава зондирующего импульса, прошедшего через исследуемую среду, или отраженного от нее, дает прогнозирующую информацию об объекте, а также информацию об энергетических параметрах и местах их селективной модификации.

Рассмотрим трехмерное математическое описание распространения импульсов.

Пусть в некоторой точке среды, принятой за начало координат, формируется направленный энергетический импульс (рис. 1), который может быть любой физической природы – электромагнитным, акустическим, механическим.

Излучатель может иметь реальную диаграмму направленности, импульс может быть произвольной формы. Импульс является направленным и описывается выражением:

$$\bar{p}(O,t) = \bar{i}p_x(O,t) + \bar{j}p_y(O,t) + \bar{k}p_z(O,t), \quad (1)$$

где под точкой «O» будем понимать точку излучения $(x_0; y_0; z_0)$.

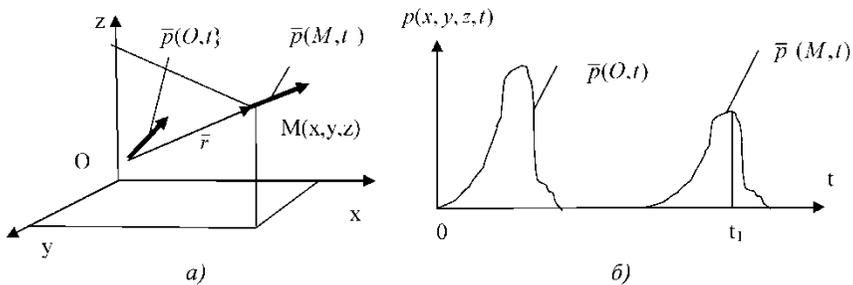


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи распространения импульса в неподвижной среде

Распространяясь в среде, импульс можем в общем случае изменять форму и направление, что определяется свойствами среды.

Целью математического моделирования является определение сигнала в заданной точке пространства $M(x, y, z)$ в заданный момент времени t . Импульс произвольной формы возбуждает в среде направленное волновое поле, состоящее из суперпозиции плоских волн различной частоты, амплитуда и фаза которых определяются преобразованием Фурье $F[p(O, t)]$ от вектора возбуждающего импульса:

$$\begin{aligned} \bar{S}(O, j\omega) &= F[\bar{p}(O, t)] = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, t) e^{-j\omega t} dt = \bar{i}S_x(O, j\omega) + \bar{j}S_y(O, j\omega) + \bar{k}S_z(O, j\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и в дальнейшем следует различать j – как мнимую часть комплексного числа и \bar{j} – как единичный вектор декартовой системы координат.

Волновые поля, возбуждаемые импульсом произвольного вида представляются в виде суперпозиции плоских гармонических волн. Для этого требуется лишь, чтобы функции, описывающие временное и пространственное изменение поля, допускали представление в виде интегралов Фурье. Распространяясь, сигнал может появиться в определенной точке (x, y, z) пространства и описываться выражением, полученным в результате творческого анализа работ [2, 3]:

$$\bar{p}(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}(O, j\omega) e^{j[\omega t - \bar{k}(j\omega)\bar{r}]} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, \tau) e^{j[(t-\tau)\omega - \bar{k}(j\omega)\bar{r}]} d\tau d\omega \quad (3)$$

где $\bar{r} = \bar{i}(x - x_0) + \bar{j}(y - y_0) + \bar{k}(z - z_0)$ - радиус-вектор заданной точки пространства относительно точки излучения,

$r = |\bar{r}| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$, $\bar{k}(j\omega)\bar{r} = xk_x + yk_y + zk_z$ - скалярное произведение волнового вектора на радиус вектор заданной точки пространства, τ – формальный параметр интегрирования.

Так как $\bar{k}(j\omega) = \bar{k}_1(\omega) + j\bar{k}_2(\omega)$ равенство (3) переписывается в виде:

$$\bar{p}(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(O, \tau) e^{\bar{k}_2(\omega)\bar{r}} e^{j[(t-\tau)\omega - \bar{k}_1(\omega)\bar{r}]} d\tau d\omega. \quad (4)$$

В работах [1, 4, 5] приведены выражения для компонентов волнового вектора для акустических и электромагнитных сигналов. Приведенные выражения, определяющие в общем виде форму и местоположение зонди-

рующего импульса, прошедшего через среду, являются математической основой для исследования сред и объектов методом импульсного зондирования. Представленный материал может использоваться при создании датчиков и устройств техногенной, технологической и экологической диагностики сред и объектов. В том числе в технологических системах нанесения изолирующих покрытий объектов трубопроводного транспорта и аэрокосмической промышленности.

Литература

1. **Глебович Г.В., Андриянов А.В., Введенский Ю.В.** Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. М. Радио и связь, 1984. 256 с.
2. **Гинзбург В.Л.** Распространение электромагнитных волн в плазме. М. Наука, 1967. 684 с.
3. **Вайнштейн Л.А.** Распространение импульсов. Успехи физических наук, том 118. Вып. 2. 1976. С. 339–369.
4. **Никольский В.В.** Электродинамика и распространение радиоволн. – М. : Наука, 1978. 444 с.
5. **Красильников В.А., Крылов В.В.** Введение в физическую акустику. – М. Наука, 1984. 444 с.

НОРМАЛЬНЫЕ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ СМЕЩЕНИЯ УЗЛОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ

Ремезов В.Б.

ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР», Москва, Россия

В отличие расчетов, выполненных ранее, например [1], преобразованные величины смещений вдоль осей « Y » и « Z » представлены отдельно. При этом виден вклад, внесенный продольной, поперечной и электромагнитоподобной [1] волнами. Упрощенные математические выражения для смещений нормального и тангенциального направлений приведены ниже. Как видно из формул и в том и в другом случаях величины смещений включают в себя 3 части:

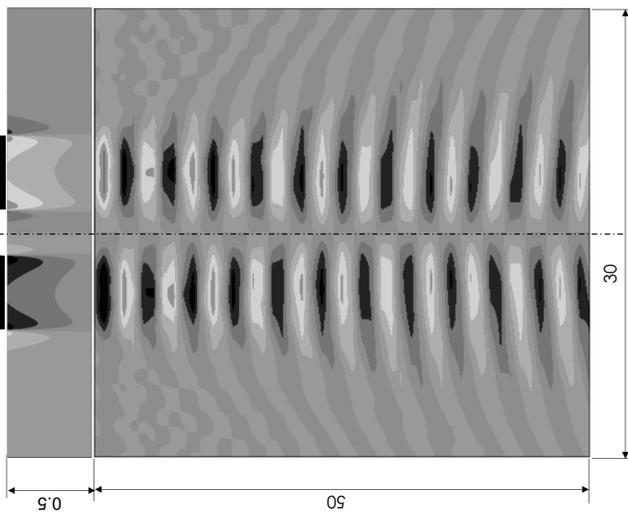
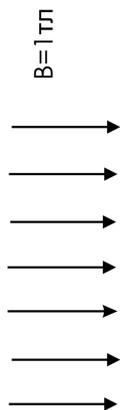
Создаваемая продольной волной.

Создаваемая поперечной волной.

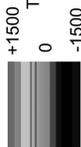
Создаваемая электромагнитоподобной волной.

Разумеется речь идет о преобразованных величинах смещений, чтобы перейти к истинным надо воспользоваться известными формулами для обратного преобразования Фурье, например [2].

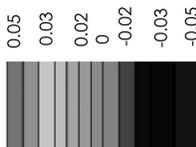
Возбуждение акустических колебаний
в нержавеющей стали



Напряжённость переменного
магнитного поля ΔH
Тангенциальная составляющая
 h_y
Абсолютные значения



Амплитуда смещений
в Ангстремах
Минимые значения
 l_m



Смещения вдоль оси 'y'

Двухпроводной противифазный
излучатель

Синусоидальный ток

Амплитуда тока в каждой
из пластин 31.4А

Частота 2.5 MHz

Представление информации в таком виде дает определенные преимущества. Например, позволяет отдельно оценивать возмущения, создаваемые электромагнитоподобной волной. Кроме того, можно отдельно оценивать величины смещений, создаваемые продольной и поперечной волнами.

Постоянные коэффициенты, входящие в формулы позволяют изменять соотношение между смещениями, создаваемыми различными видами колебаний

$$u_y = -\frac{x}{L} C_2 \cdot e^{-iq_{tz}z} + \frac{D}{x} C_4 \cdot e^{-iq_{tz}z} + U_y \cdot \exp\left[-i^{3/2} kz\right],$$

$$u_z = C_2 \cdot e^{-iq_{tz}z} + C_4 \cdot e^{-iq_{tz}z} + U_y \cdot \exp\left[-i^{3/2} kz\right].$$

В этих формулах: X – относительный спектральный параметр; Z – координата по вертикали, отсчитывается от поверхности объекта возбуждения; k – нормальная проекция волнового вектора электромагнитного поля; q_{tz} и q_{tz} – нормальные проекции волновых векторов соответственно для продольной и поперечной акустических волн; U_y и U_z – величины смещений, создаваемых электромагнитоподобной волной на поверхности материала, т.е. $z = 0$; D и L – отношение нормальных проекций волновых векторов соответственно для поперечных и продольных волн к волновому вектору поперечных волн; C_2 и C_4 – постоянные коэффициенты, (не зависящие от Z).

Примечание: подробно обозначения всех параметров приведены в [1].

Полученные результаты позволяют рассчитывать величины смещений в любой точке плоскости, перпендикулярной плоскости излучателя. Для наглядного представления результатов электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования целесообразно строить графики в формате 3D. Один из таких графиков приведен на рисунке. Он дает представление о возбуждении и распространении акустических колебаний в нержавеющей стали.

Литература

1. **Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А.** К основам ЭМА-толщинометрии с помощью накладных преобразователей. 1. Прямое ЭМАП в нормальном поляризующем поле. Дефектоскопия № 10. 2006 г.
2. **Выгодский М.Я.** Справочник по высшей математике. Москва, Астрель. 2006 г. 991 с.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОНТРОЛЯ РЕЛЬС, УЛОЖЕННЫХ В ПУТЬ, МАГНИТНЫМ, ВИХРЕТОКОВЫМ И КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДАМИ

Мякушев К.В.

НУЦ «КАСКАД» при МГУПИ, ООО «РДМ-контакт», Москва, Россия

Неразрушающий контроль рельс, уложенных в путь, представляет собой актуальную проблему, решаемую современными средствами НК не в

полном объеме. В данной статье проводится оценка возможностей контроля рельс уложенных в путь магнитным, вихретоковым и комбинированными методами, особый акцент сделан на контроль зоны перьев подошвы (рис. 1). На сегодняшний день эта зона практически не поддается контролю ни одним из существующих методов.

Магнитный метод контроля, основанный на регистрации потоков рассеяния, предполагает создание системы намагничивания объекта контроля до состояния насыщения или близкого к нему. Система намагничивания может быть реализована как на постоянных магнитах, так и на электромагнитах. Каждый

из вариантов обладает своими преимуществами и недостатками, однако на информативности контроля способ намагничивания не сказывается. В рамках данного исследования оценивалась возможность использования системы сплошного намагничивания с вводом потока через поверхность катания и локальных систем намагничивания с вводом потока непосредственно в перо подошвы. Первый вариант предполагает установку на вагон дефектоскоп. Расчеты, проведенные с помощью метода конечных элементов, показали, что такая система получается слишком массивной и создает слишком большую силу притяжения к рельсу (более 1 т не считая собственного веса). При этом контроль осложняется большим количеством ферромагнитного мусора, встречающегося на пути в непосредственной близости от рельс. При регистрации сигнала на поверхности катания, сигнал от дефектов в перьях подошвы оказывается слишком слабым и не может быть выделен на фоне сигналов от сопутствующих ферромагнитных масс, в первую очередь клемм и подкладок. Расположение первичных преобразователей непосредственно на перьях подошвы при контроле с использованием вагона дефектоскопа недопустимо из-за большого количества мешающих факторов (накладки, стрелки, переезды и пр.). Реализация метода с локальным намагничиванием предполагает установку системы на ручную тележку с возможностью поднятия при прохождении препятствий. Однако пространство между клеммой и шейкой рельса не позволяет разместить конструкцию, достаточную для намагничивания области контроля до приемлемого уровня.

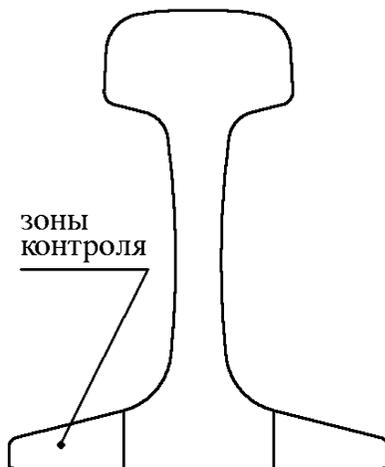


Рис. 1. Зоны контроля

Вихретоковый метод контроля позволяет разместить первичные преобразователи непосредственно над зоной контроля и обеспечивает хорошее выявление дефектов со стороны сканируемой поверхности. Применение первичных преобразователей специальных конструкций позволило получать сигналы приемлемого уровня от дефектов, расположенных на тыльной (нижней) стороне подошвы, однако в зоне над подкладкой (рядом с клеммой) выявление таких дефектов сильно затруднено. Выявление скрытых дефектов, не выходящих на поверхность невозможно по всей длине рельса.

Существенно улучшить ситуацию позволило применение комбинированного-вихретоково-магнитного метода. При использовании этого метода нет необходимости доводить материал объекта контроля до насыщения, поэтому для этих целей подходит магнитная система локального намагничивания в комбинации с вихретоковым преобразователем. Однако контроль зоны над шпалами, по-прежнему, затруднен из-за рассеяния потока намагничивания в подкладку и близости ферромагнитной клеммы и противоугонов (при наличии).

В результате использования комбинированной конструкции удалось добиться выявления дефектов в перьях подошвы по всему сечению пера подошвы вне зоны расположения подкладок, что составляет примерно 50 % погонной длины рельса. В зоне над подкладками и в непосредственной близости от них обеспечивается выявление дефектов, выходящих на поверхность сканирования.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО И АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Мишакин В.В.¹, Данилова Н.В.¹, Ключников В.А.¹, Пичков С.Н.²

*¹Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, Нижний Новгород, Россия
²ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия*

Доклад посвящен вопросам оценки состояния конструкционных сталей акустическим и оптическим методами на ранних стадиях усталостного разрушения, а также под вязким покрытием при стресс-коррозионном разрушении.

Среди методов НК, достаточно чувствительных к структурному состоянию и поврежденности, можно выделить относительно дешевый и безопасный акустический метод. Как правило, акустический метод используют для выявления макродефектов (в том числе усталостных трещин) материалов конструкций различного назначения.

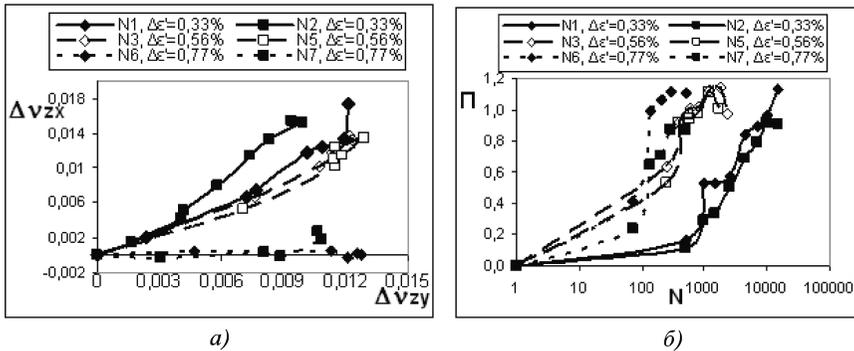


Рис. 1. Зависимости между изменениями коэффициентов Пуассона v_{zx} и v_{zy} (а); зависимость параметра Π от количества циклов нагружения (б)

Исследования показали, что структурно-чувствительные акустические параметры позволяют обнаруживать деградацию структуры материала на ранних стадиях разрушения задолго до образования макротрещины. Исследовалась сталь 08X18H10T, широко используемая в машиностроении при изготовлении сварной аппаратуры, работающей в средах повышенной агрессивности (растворах кислот, щелочей и солей), теплообменников, труб, деталей печной арматуры и других элементов.

На рис. 1, а приведены зависимости между изменениями коэффициентов Пуассона v_{zx} и v_{zy} , измеряемых акустическим методом для стали 08X18H10T, подвергаемой усталостному разрушению при одноосном нагружении. Индекс z в v_{zx} и v_{zy} обозначает направление распространения упругих волн, перпендикулярное поверхности образца, индексы x и y – направления поляризации поперечных волн вдоль и поперек оси нагружения, для образцов, подвергнутых циклическому нагружению с разными амплитудами общей деформации $\Delta\varepsilon'$ ($\Delta\varepsilon' = \Delta\varepsilon_{pl} + \Delta\varepsilon_{el}$, $\Delta\varepsilon_{el}$ – амплитуда упругой деформации).

Связь $\Delta v_{zx}(\Delta v_{zy})$, хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Угол наклона кривой $\Delta v_{zx}(\Delta v_{zy})$ определяется амплитудой деформации $\Delta\varepsilon'$.

Кривую $v_{zx}(v_{zy})$ предлагается использовать для оценки степени деградации материала акустическим методом на ранних стадиях разрушения до появления макротрещины. С этой целью был введен параметр Π для оценки состояния материала:

$$\Pi = \frac{L}{L^* + f(\Delta v_{zx}^* / \Delta v_{zy}^*)} \quad (1)$$

где L – длина кривой $v_{zx}(v_{zy})$, $L = (\Delta v_{zx}^2 + \Delta v_{zy}^2)^{1/2}$; L^* – среднее значение длины кривой для критических величин Δv_{zx}^* и Δv_{zy}^* , $L^* = 0,016$, $f(\Delta v_{zx}^* / \Delta v_{zy}^*)$ – некоторая корректирующая длину кривой функция, которая зависит от угла наклона кривой, характеризуемого соотношением $(\Delta v_{zx}^* / \Delta v_{zy}^*)$.

Зависимости параметра Π от количества циклов нагружения приведены на рис. 1, б. Момент достижения параметром Π значения, близкого к единице, характеризуется появлением макротрещины.

Особенностью разрушения при упругопластическом циклическом деформировании является то, что накопление микрповреждений происходит областях материала с повышенной микропластической деформацией. Плотность участков S , в которых происходит локализация микропластических деформаций, будем определять как отношение количества микроочагов (зерен) с повышенной деформацией n (абсолютные значения деформации E зерна выше 0,3) к общему количеству наблюдаемых зон N_z , $S = \frac{n}{N_z}$.

Получено, что условие образования макротрещины определяется следующим выражением:

$$\left(\frac{\Delta v_{zy}}{S} \right) \geq k_{S0} + k_{S1} \left(\frac{\Delta v_{zx}}{\Delta v_{zy}} \right)^*, \quad (2)$$

где $(\Delta v_{zx} / \Delta v_{zy})^*$ – определяются при критических значениях величин S , Δv_{zx} и Δv_{zy} , k_{S0} , k_{S1} – коэффициенты ($k_{S0} = 0,02$; $k_{S1} = -0,004$).

Микропластические деформации образцов определялись путем измерения расстояний между точками пересечения условной опорной линии с границами зерен материала до и после усталостного нагружения (средний диаметр зерна материала $\bar{d} \approx 24$ мкм, наблюдалась высокая разнобальность). Микропластические деформации E измерялись как вдоль (E_x) так и поперек (E_y) направления нагружения материала. Погрешность измерения микропластических деформаций составляла 0,15 %. Оптические измерения проводились с помощью переносной малогабаритной установки СПЕКТР МЕТ.

В докладе также приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния вязких покрытий на характеристики волн Лэмба. Приведены результаты исследования стресс-коррозионной поврежденности фрагмента бывшей в эксплуатации трубы магистрального трубопровода (сталь 09Г2С), находящейся под защитным покрытием.

Исследование показало, что наличие вязкого защитного мастичного покрытия «Гранскор-Газ» приводит к заметному изменению дисперсионных кривых и затуханию волн Лэмба. Наличие участков с плотностями трещин $\rho = 2,28 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ и $\rho = 3,28 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$, ведет к увеличению затухания до 4 Нп/м. Исследования также показали, что для увеличения площади про-

звучивания целесообразно использовать в качестве источника сигналов ударное возбуждение с нормированной силой удара.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты №09-08-00892-а, №09-08-00827-а, №11-08-97070-р_поволжье_а).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНАЦИИ МЕТОДОВ NDT

Makarov I.V., Skala I.J., Horak I.V
VZLÚ a.s., Prague, Czech Republic

Тезисы: Отдел прочности конструкций с лабораторией NDT проводит для авиапрома Чехии усталостные испытания, как целых авиационных конструкций, так и их отдельных составляющих. На примерах применения комбинации методов NDT (VT, AE, UT, ET) с целью детекции повреждений (трещин), в течении усталостных испытаний, узла крепления крыла самолета VUT 100 проиллюстрирована комплексность детекции, а так-же способность лаборатории NDT отдела прочности конструкций успешно решать такие задачи. Применение комбинации методов VT, AE, UT, ET значительно повышает вероятность индикации дефекта уже в начальной стадии его возникновения. На ряду с этим сокращается время проведения дефектоскопического контроля и как следствие снижаются затраты связанные с проведением усталостных испытаний конструкции.

Ключевые слова: усталостные испытания, трещина, NDT

Применение комбинации NDT методов AE, UT, ET.

Перечень оборудования применённый для детекции повреждений испытательного образца узла крепления крыла самолета VUT-100:

– AE система Dakel Xedo Vox-16 – для регистрации акустической эмиссии в комбинации с датчиком MINI 04 а IZ 09. Регистрация данных проводилась с помощью блока управления Acer Travel Mate2003 LMi, посредством коммуникационного канала Ethernet Planet ENW-3502-2T, с записью на жесткий диск этого блока. Процесс измерений обеспечивала программа управления Daemon а к презентации результатов измерений применялась программа обработки данных DaeShow.

– Masterscan 340 (SONATEST) с угловым (45°) преобразователем MSG2550-5MHz – прибор для ультразвукового контроля внутренних разрушений.

– Defectometer 2.837 (Institut Dr. Foerster) – прибор для контроля поверхностных дефектов методом вихревых токов с угловым датчиком NFe 2.835.01-2600.

Результаты испытаний:

Усталостные испытания узла подвески крыла VUT-100 проводились на испытательном оборудовании MTS 250 kN. Испытательный образец подвергался циклическому нагружению с номинальной силой $FH = 158,25 \text{ kN}$ и с периодом $f = 1,7 \text{ Hz}$.

Места съема акустических сигналов и места тензометрических измерений напряжений, вызванных нагружением, изображены на рис. 1

Испытательный образец был спроектирован как толстостенная конструкция и изготовлен из D16. Шарнирное соединение обеих частей образца было реализовано посредством запрессованных каленых стальных втулок и цапфы.

NDT-контроль проводился по predetermined количеству циклов нагружения. Места NDT контроля уха 2B4 образца изображены на рис. 2.

Методом акустической эмиссии (АЕ) был идентифицирован доминирующий сигнал, который периодически возникал при обработке снимаемых сигналов. Был инициирован соединением между частью А и В, испытуемого образца. Паразитный сигнал выходил от соединения: втулка-цапфа-подкладка.

На основании этих сведений оказалось возможным идентифицировать новый эмиссионный сигнал, выходящий от фронта трещины а определить начальную стадию разрушения.

При 170 000 циклах была определена начальная фаза раскрытия трещины при текущем контроле образца, в соответствии с состоянием нагружения.

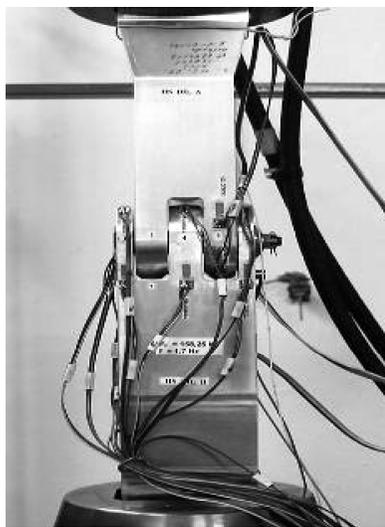


Рис. 1

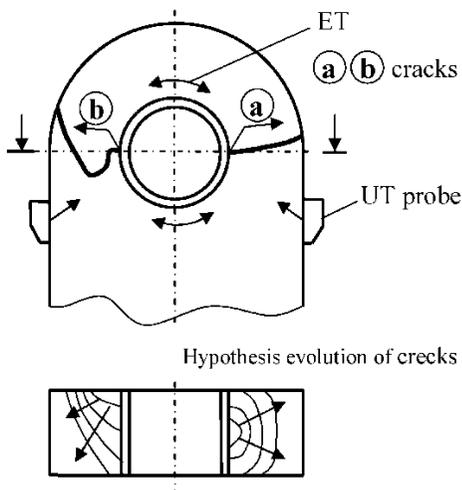


Рис. 2

Ранняя индикация начальной стадии возникновения разрушения является предметом исследовательских работ для усовершенствования оборудования для неразрушающего контроля методом акустической эмиссии.

При 175 000 циклах нагружения образца, во время очередной дефектоскопической инспекции было подтверждено расширение разрушения (трещины) «а» в уху 2В4 и методом УТ. В течении дальнейшего нагружения были обнаружены последующие внутренние изменения в ухе образца ультразвуковым методом, которые изображены на рис. 2.

При 185 000 циклах на боковых поверхностях уха были зарегистрированы трещины «а» (длиной 6мм) методом вихревых токов (ЕТ)

При 175 000 циклах на боковой поверхности уха была зарегистрирована трещина «б», длиной 8 мм, методом ЕТ. Рост трещины «б» во внутренней структуре уха был также подтверждён *ультразвуковым методом*.

Результаты фрактографического анализа:

На микроснимках задокументирован характер ломовых поверхностей. К ним приложен вид на боковые поверхности уха с изображением характера разрушения с обозначением циклов нагружения (рис. 3).

Применением комбинации NDT методов АЕ, УТ и ЕТ было достигнуто:

- существенное повышение вероятности индикации повреждений целостности испытываемой конструкции в начальной стадии возникновения этих повреждений;
- сокращение периода дефектоскопического контроля и времени на проведение испытаний;
- снижение затрат на проведение усталостных экспериментов испытываемых конструкций.

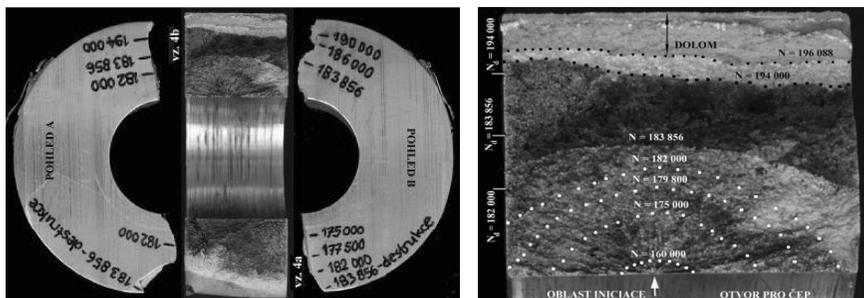


Рис. 3

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Кудинова Е.В., Бакурова Ю.А.
ЛФ ФГОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»

В процессе резания происходит истирание поверхностного слоя режущего инструмента и, следовательно, меняется его структура. Кроме того, в поверхностный слой резца внедряются микрочастицы обрабатываемого материала, а режущая кромка резца переходит из одной области обрабатываемого материала заготовки к другой. Все это приводит к изменению термоэлектрических свойств резца и обрабатываемой заготовки, и таким образом к изменению чувствительности естественной термопары инструмент-деталь. Поэтому возникает необходимость характеризовать каждый из электродов естественной термопары в отдельности. В качестве характеристики используют термоэлектрическую способность (ТЭС) материала.

При исследовании распределения ТЭС по поверхности материалов используется метод полустандартной термопары [1], электродами которой служат исследуемый материал и стандартный измерительный электрод, термоэлектрические свойства которого заранее известны, и измеряется термоЭДС. Для получения термоэлектрического эффекта проводится локальный нагрев поверхности исследуемого материала. Измерение ТЭС в различных точках указанной поверхности осуществляется путем последовательного переноса измерительного электрода в различные точки поверхности.

Для проведения дальнейших расчетов удобно использовать коэффициент относительной ТЭС исследуемого материала, выраженный отношением значения термоЭДС E_{pV2} , измеренной полустандартной термопарой

к значению термоЭДС, измеренной искусственной термопарой: $k = \frac{E_{pV2}}{E_{pV1}}$.

В нашем случае термоэлектрическая способность передней и задней поверхностей резца, его режущей кромки, а также ТЭС обрабатываемых заготовок определялась по отношению к термоэлектрической чувствительности стандартной хромель-копелевой термопары ТКХ(L).

Было выполнено по 40 измерений для каждого из исследуемых материалов. По полученным результатам были определены точечные оценки результатов измерений для различных точек исследуемой поверхности: их средние арифметические значения k_{cp} и средние квадратические значения отклонений S_k результатов измерений представлены табл. 1 и 2.

Из данных представленных в табл. 1, следует, что при износе инструмента среднее значение возрастает и степень неоднородности также резко

1. Точечные оценки результатов измерений коэффициента k относительной ТЭС для передней и задней поверхностей, а также режущей кромки резца, в зависимости от степени износа

Исследуемая поверхность инструмента	Среднее арифметическое, k_{cp}		Дисперсия		Среднее квадратическое отклонение, S_k	
	Новый	Изношенный	Новый	Изношенный	Новый	Изношенный
Передняя	0,228	0,349	0,000585	0,002301	0,024183	0,047968
Задняя	0,189	0,394	0,000398	0,000266	0,019939	0,016306
Режущая кромка	0,293	0,362	0,000204	0,001338	0,014279	0,036585

изменяется, причем при износе передней поверхности и режущей кромки резца дисперсия возрастает и, следовательно, неоднородность увеличивается, а для задней поверхности наблюдается уменьшение дисперсии. Износ достаточно сильно сказывается на рабочем участке режущей кромки резца, где дисперсия выросла приблизительно в 7 раз.

Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает, что поверхностный слой материала заготовок до и после их механической обработки характеризуется разными термоэлектрическими способностями. Для мягких сталей установлено, что механическая обработка приводит к значительному увеличению дисперсии значения коэффициента k относительной ТЭС. Для твердых сталей такая зависимость не установлена. В некоторых случаях, как например, для стали 20, после механической обработки дисперсия даже уменьшилась. Увеличение дисперсии для мягких сталей может быть объяснено внедрением микрочастиц режущего инструмента в их поверхность.

2. Точечные оценки результатов измерений коэффициента k относительной ТЭС обрабатываемых марок материалов до и после их механической обработки

Исследуемая марка обрабатываемого материала	Среднее арифметическое, k_{cp}		Дисперсия		Среднее квадратическое отклонение, S_k	
	до мех. обр-ки	после мех. обр-ки	до мех. обр-ки	после мех. обр-ки	до мех. обр-ки	после мех. обр-ки
Ст 3	0,326	0,333	0,000094	0,00027	0,0097	0,016
Сталь 20	0,344	0,326	0,00014	0,000091	0,012	0,010
Сталь 45	0,428	0,418	0,00017	0,00019	0,013	0,014

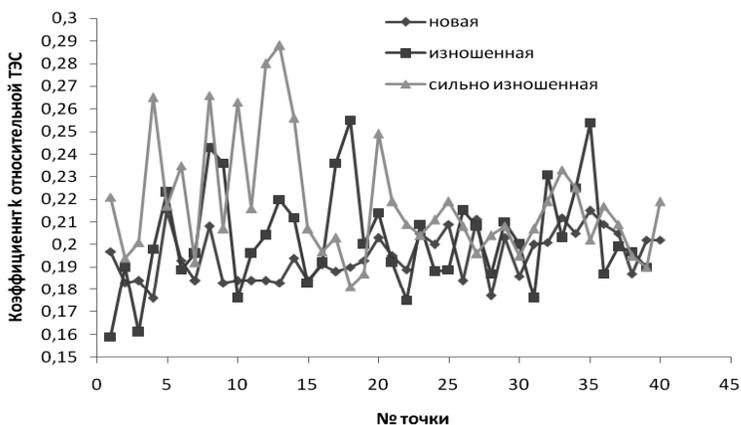


Рис. 1. График изменения коэффициента k относительной ТЭС в зависимости от степени износа разверток

Проведенные исследования показали, что в независимости от обрабатываемого материала дисперсия ТЭС при износе резца увеличивается. Таким образом, дисперсия ТЭС может служить показателем износа резца.

Однако, при проведении экспериментов с резцами было трудно установить связь линейного износа резца с дисперсией ТЭС из-за сложности измерения износа резца. Поэтому было необходимо найти процесс резания, при котором было бы возможно установить зависимость не только качественной связи износа резца с дисперсией ТЭС, но и количественную связь. В качестве такого процесса было выбрано развертывание отверстий, так как геометрический износ развертки может быть достаточно строго измерен.

Была исследована связь дисперсии ТЭС режущего инструмента с его линейным износом на примере разверток, для чего были проведены эксперименты с использованием в качестве режущего инструмента разверток с различной степенью износа.

С целью исследования вариаций ТЭС режущих кромок развертки были проведены измерения коэффициента k относительной ТЭС зубьев развертки в разных точках режущих кромок инструмента. Исследованию были подвергнуты новые, изношенные и сильно изношенные развертки. Измерение ТЭС осуществлялось вдоль каждого зуба развертки в точках, расположенных в зоне перехода режущей части в калибрующую, так как изнашивание разверток, чаще всего, происходит именно в данном месте, а также вдоль каждого зуба, в пределах калибрующего участка развертки.

3. Точечные оценки результатов измерений коэффициента k относительной ТЭС режущих кромок в зависимости от степени износа разверток

Состояние исследуемой развертки	Точечные оценки результатов измерений коэффициента k относительной ТЭС		
	среднего арифметического $k_{\text{ср}}$	среднего квадратического отклонения S_k	дисперсии D
Новая	0,186	0,011	0,000122
Изношенная	0,203	0,023	0,000509
Сильно изношенная	0,218	0,026	0,000689

Для экспериментальных исследований были взяты машинные развертки, так как у них шаг между зубьями строго постоянный. Для каждой из разверток было выполнено по 40 измерений.

Данные, представленные на рис. 1, показывают изменение коэффициента k относительной ТЭС в зависимости от степени износа разверток, а также в зависимости от удаленности рассматриваемой точки от начала режущей части (точки расположены на расстоянии 0,4 мм друг от друга). Из графиков видно, что средние значения ТЭС возрастают по мере удаления от начала режущей части до 8–15 точки, а затем уменьшаются. Это объясняется тем, что максимальное значение износа приходится на переход врезающей части в калибрующую, кроме того, большая нагрузка падает на начальный участок калибрующей части, чем на последующий, поэтому начальный участок изнашивается сильнее последующего. Все сказанное наиболее сильно проявляется в характере изменения дисперсии ТЭС развертки.

Точечные оценки результатов измерений коэффициента k относительной ТЭС режущих кромок в зависимости от степени износа разверток представлены в табл. 3.

На основании данных, полученных при измерении геометрических параметров разверток, и их сопоставления с полученными значениями дисперсии, построена зависимость изменения дисперсии ТЭС от линейного износа режущей кромки развертки.

На рис. 2 приведен пример полученной зависимости для двух разверток диаметром 4 мм при обработке отверстия в заготовке из стали 45.

Измерение ТЭС позволяет оценить износ развертки, но требует прерывания процесса резания, что исключает возможность диагностики износа режущего инструмента в процессе его эксплуатации.

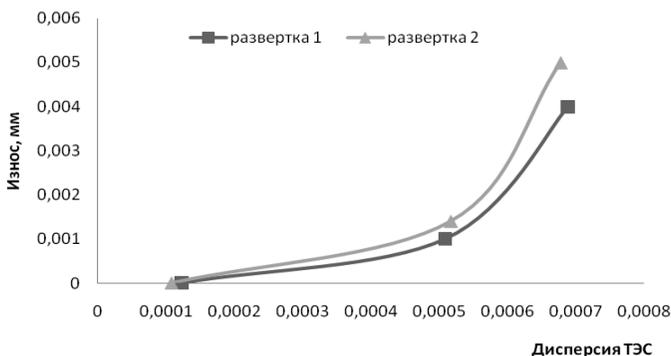


Рис. 2. Зависимости изменения дисперсии ТЭС от линейного износа режущей кромки развертки

Литература

1. **Кузнецова Е.В.** Устройство для определения поверхностной термоэлектрической способности материалов [Текст] / Е.В. Кузнецова // 5-я Международная научно-практическая конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». Тезисы докладов. – М.: Машиностроение 1, 2006. С. 171.
2. **Лухвич А.А.** Структурная зависимость термоэлектрических свойств и неразрушающий контроль [Текст] / А.А. Лухвич, А.С. Каролик, В.И. Шарандо. – Мн.: Навука і тэхніка, 1990. – 192 с.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ДВИГАТЕЛЯ

Сафин Ар.Ил., Иголкин А.А., Крючков А.Н.,
Макарьянц Г.М., Шахматов Е.В.

СГАУ им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам диагностирования гидрогазовых систем средствами лазерной виброметрии. Объектами исследования являются 4 катколлектора для 16 клапанного двигателя автомобиля ВАЗ. Диагностирование осуществляется с применением трех компонентного лазерного виброметра.

Работоспособность, ресурс и качество изделий машиностроения и аэрокосмической техники, содержащих в своем составе трубопроводные системы, в значительной степени зависят от интенсивности гидродинамических и виброакустических процессов, к которым следует отнести пульсации рабочих сред, вибрацию механических элементов, излучаемый агрегатами и системами шум.

Проблема снижения интенсивности виброакустических процессов в системах двигателя носит комплексный характер, ее решение обеспечит не только работоспособность и улучшенные технические характеристики машин и оборудования, но и увеличит эффективность работы системы «человек–машина». Кроме того, снижение шума и вибрации имеет огромное социальное значение.

Следует отметить, что виброакустика машин тесно связана с их динамикой. В виброакустике машин основной задачей является разработка комплексного подхода к исследованию и коррекции виброакустических процессов в машинах и оборудовании как взаимодействующей совокупности пульсаций рабочей среды, вибрации механических элементов и излучаемого шума с учетом акустических и гидродинамических (в том числе вихревых) возмущений.

Температура поверхности катколлектора во время работы двигателя достигает значительных величин. Вследствие чего исключается возможность установки датчиков ускорения или силы. Поэтому для проведения испытаний использовался лазерный виброметр для бесконтактного измерения виброускорения поверхности катколлекторов.

В результате проведенных исследований были получены спектр виброускорения и формы колебаний катколлекторов, в том числе и собственные формы, соответствующие резонансным частотам. На рис. 1 изображен вектор виброускорения по координате, осредненный по всем точкам.

Из анализа форм колебаний представленные на рисунке 2 видны участки катколлекторов с наибольшими амплитудами виброускорения.

В результате проведенных опытов был получен спектр виброускорения и формы колебаний катколлекторов, в том числе и собственные формы, соответствующие резонансным частотам.

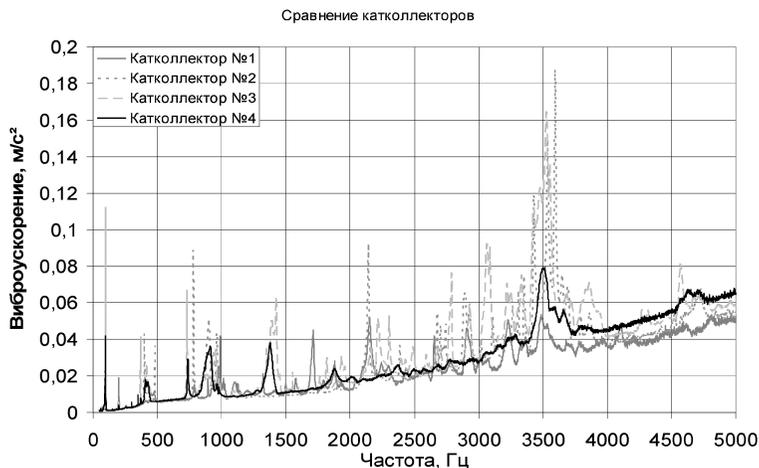
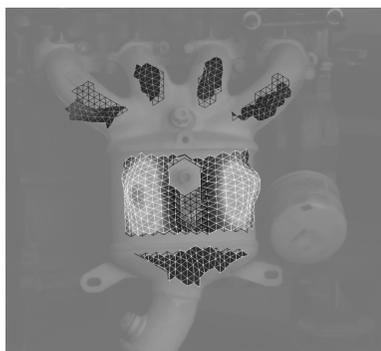


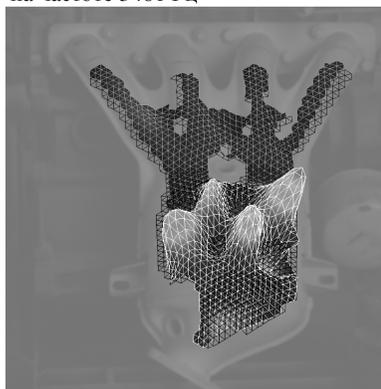
Рис. 1. Сравнение спектрограмм усредненного по поверхности виброускорения



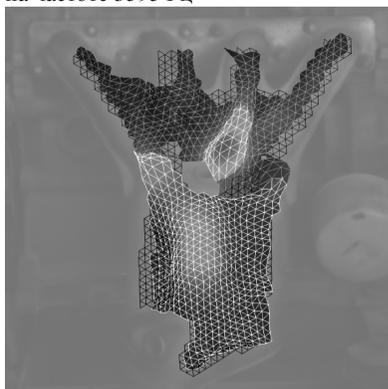
на частоте 3481 Гц



на частоте 3595 Гц



на частоте 3518 Гц



на частоте 3504 Гц

Рис. 2. Собственная форма колебаний

Литература

1. **Макарьянц Г.М.** Исследование собственных частот и форм колебаний воздушного объёма реверберационной камеры [Текст] / Г.М. Макарьянц, А.Б. Прокофьев, А.А. Иголкин, А.Н. Крючков // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» 26–27 июня 2003 г. Тезисы докладов, II часть. – Самара: СГАУ, – 2003. С. 127–128.

2. **Макарьянц Г.М.** Модальный анализ приборной панели космического аппарата [Текст] / А.И. Сафин, Г.М. Макарьянц, В.Н. Вякин, А.А. Иголкин, А.Н. Крючков // Региональная научно-практическая конференция, посвящённая 50-летию первого полета человека в космос. Самара, 14–15 апреля 2011 г.: тезисы докладов. – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011. – С. 106 – 108. ISBN 978-5-7883-0839-5.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕРОД- УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С РАЗЛИЧНЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Панин С.В., Бурков М.В., Бяков А.В., Любутин П.С.
*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томск, Россия*

В изделиях и конструкциях из волокнистых композиционных материалов (КМ) дефекты зачастую зарождаются в процессе эксплуатации и имеют крайне малый размер, поэтому актуальным является разработка новых или адаптация существующих методов неразрушающего контроля (контроля состояния), способных выявлять повреждения такого рода (и размера). Путем совместного использования метода тензометрии, АЭ и оптического метода измерения деформации предоставляется возможность, как оценить интегральную и локальную деформацию в нагруженном образце, так и зарегистрировать процессы разрушения, сопровождаемые излучением упругих (акустических) волн [1].

С применением комбинированного (тензометрия – DIC – АЭ) подхода в настоящей работе проведено исследования процессов деформации и разрушения образцов из углерод-углеродного КМ (УУКМ) с различными типами концентраторов напряжений (центрального отверстия с диаметрами 7, 10, 13 мм, надпила на боковой грани шириной ~1 мм и глубиной 14,5, 18, 21,5 мм и 2-х V-образных надрезов высотой по 3, 4, 5 мм.).

Помимо выбора *in situ* методов исследования деформации актуальным является вопрос выбора информативных параметров, адекватно характеризующих развитие деформационных процессов на каждом из указанных масштабов. В качестве таких параметров для метода АЭ использовали активность событий $\dot{N}_{\Sigma} = dN_{\Sigma} / dt$; для метода DIC – интенсивность деформации сдвига γ (ИДС), для тензометрии – $d\sigma / dt$ (производную внешнего приложенного напряжения по деформации, либо времени).

Образцы с отверстием и надпилем испытывали на одноосное статическое растяжение на электро-механической машине Instron 5582 со скоростью перемещения подвижного захвата 0,3 мм/мин. Образцы с V-образными надрезами испытывали на срез с помощью приспособления, предлагаемого в стандарте ASTM D5379, со скоростью 0,1 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 [2]. Фотографирование поверхности осуществляли с помощью фотокамеры Canon EOS 550D, оснащенной длиннофокусным объективом Canon EF-S 100-400mm 1/4-5.6 IS.

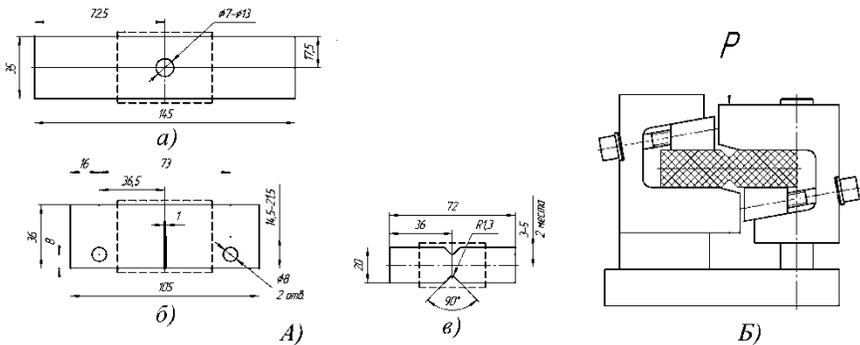


Рис. 1. А) схемы образцов (толщина 4 мм), штриховой линией показана область, выделяемая для построения поля векторов перемещений:

а – образец с отверстием; *б* – образец с надпилем; *в* – образец с V-образными надрезами; *Б* – эскиз приспособления для испытания на срез

Данные тензометрии (производную $d\sigma/dt = f(t)$), как наиболее достоверный способ интегральной оценки напряженно-деформированного состояния нагруженных материалов, применяли как основу для сравнения данных, полученных оптически и акустическим способами.

На рис. 2 приведены графики изменения информативных параметров от времени нагружения для всех трех методов измерения деформации. Вертикальными линиями обозначены стадии (обозначены римскими цифрами), выделенные на кривой $d\sigma/dt$ с помощью кусочно-линейной аппроксимации.

Графики интенсивности деформации сдвига также аппроксимированы кусочно-линейно, в то время как данные акусто-эмиссии усреднены гладкой кривой.

Данная работа представляет попытку авторов применить комбинированный способ исследования деформации и разрушения (тензометрия – DIC – АЭ) для анализа деформационного поведения нагруженных образцов

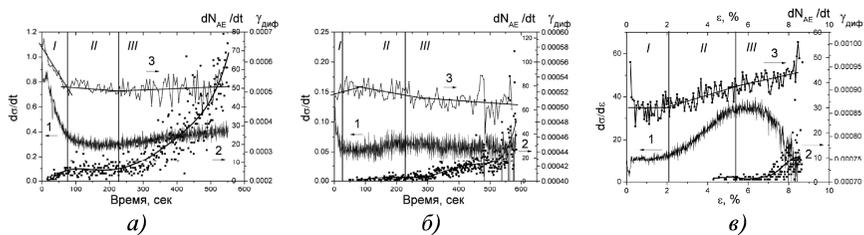


Рис. 2. Совмещенные графики производной внешнего деформирующего напряжения $d\sigma/dt$ (1), активности АЭ dN_{AE}/dt (2) и интенсивности деформации сдвига, рассчитанной дифференциальным способом (3):

а – образец с отверстием $\varnothing 7$ мм; *б* – образец с надпилем глубиной 14,5 мм; *в* – образец с надрезами высотой 3 мм

УУКМ. Ранее этот способ применяли для исследования деформации алюминиевого сплава Д16АТ [3], поэтому обсуждение следует начать со сравнения результатов настоящего исследования с полученными ранее при испытании алюминиевых образцов.

Так, для алюминиевых образцов на начальных стадиях нагружения метод акустической эмиссии является наиболее чувствительным к развитию деформации. С дальнейшим увеличением уровня 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, позволяют выявить переход от одной стадии деформации к другой. Метод DIC позволяет визуализировать деформационные процессы на поверхности материала с получением их численной оценки.

Полученные данные предлагается использовать для неразрушающего контроля конструкционных материалов, путем выделения характерных стадий развития деформации и момента, предшествующего разрушению. Дальнейшее развитие этого способа НК связано с применением его для усталостных испытаний волокнистых КМ.

Литература

1. **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.
2. **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.
3. **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).

НОВЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ НК «UNISCOPE»

Елизаров С.В., Алякритский А.Л., Кольцов В.Г.,
Барат В.А., Ростовцев М.Ю.
ООО «ИНТЕРЮНИС», Москва, Россия

Компания «ИНТЕРЮНИС» с 1988 года работает в различных областях неразрушающего контроля, занимается разработкой и производством АЭ оборудования, осуществляет экспертизу промышленной безопасности объектов социальной инфраструктуры и оборудования промышленных

Рис. 1. Общий вид прибора:
 1 – клавиатура; 2 – дисплей;
 3 – кнопка «ВКЛ/ВЫКЛ»;
 4а,б – разъемы каналов;
 5 – заглушка отсека интерфейсных разъемов;
 6а,б – разъемы цифровых каналов



предприятий, проводит научные исследования, разрабатывает и устанавливает системы комплексного диагностического мониторинга. На сегодняшний день выпущено более 450 АЭ комплексов серии A-Line восьми модификаций, включая и уникальные до сих пор модульные АЭ системы с цифровой передачей данных от объекта контроля до центрального компьютера.

Представленный ниже универсальный инструмент НК, названный «UNISCOPE» созвучно с названием компании, является новейшей разработкой, призванной удовлетворить самые широкие потребности специалистов НК. На данный момент на базе единой аппаратной платформы прибор объединяет в себе 2-х каналную АЭ систему с передовыми характеристиками, акустический течеискатель, тензоизмеритель и вибромметр. Кроме того, в разработке находятся дополнительные функции «UNISCOPE», которые в перспективе позволят использовать его как ультразвуковой толщиномер, генератор тестовых электрических и упругих импульсов, интегральный толщиномер, измеритель электрохимических потенциалов и блуждающих токов, вихретоковый дефектоскоп и магнитометр. Подобная универсальность достигается за счет использования различных внешних измерительных блоков, подключаемых к общему вычислительному устройству, оснащенного многофункциональным ПО с современным дружественным интерфейсом.

На рис. 1 приведен общий вид прибора с расположением органов управления и разъемов для подключения внешних блоков и датчиков.

1. Основные характеристики аналогового канала регистрации АЭ

Диапазон рабочих частот	0,5 Гц – 1 МГц
Варианты переключаемых длин кабельных линий	до 10 м, до 100 м
Разрядность АЦП	16
Максимальная частота преобразования АЦП	20 МГц

Отличительными особенностями «UNISCOPE» являются: малый вес и оптимальная эргономика для работы в полевых условиях; высокий современный уровень аппаратного и программного обеспечения; два широкополосных универсальных измерительных канала и два цифровых входа для подключения внешних измерительных блоков; графическое отображение результатов измерений на цветном LCD дисплее; хранение больших объемов данных на легкодоступных носителях информации; возможность объединения двух и более приборов для многоканальных измерений; продолжительное время работы от двух встроенных аккумуляторов.

В режиме АЭ измерений «UNISCOPE» предназначен для неразрушающего контроля промышленных и технологических трубопроводов, переходов и перемычек, запорной арматуры и регуляторов давления, сосудов и баллонов, грузоподъемных механизмов и другого промышленного оборудования с возможностью линейной локализации источников АЭ и оперативной оценки их степени опасности.

Основные характеристики аналогового канала регистрации АЭ приведены в табл. 1. Кроме того, для улучшения качества выделения полезного сигнала на фоне шумов различного рода предусмотрено применение цифровых частотных фильтров и предварительной аппаратной фильтрации входных данных по параметрам АЭ-импульсов. Параллельно с регистрацией АЭ по двум аналоговым каналам, реализована и возможность записи параметрической информации по двум цифровым каналам в едином масштабе времени для повышения качества анализа диагностической информации.

В режиме течеискания «UNISCOPE» позволяет выявлять и количественно оценивать величины протечек запорной арматуры различного типа и назначения, рабочего давления и диаметра для жидкой и газообразной рабочей среды. Функция течеискания реализована на базе каналов регистрации АЭ импульсов. Характерная форма течевых сигналов распознается программным обеспечением системы. На основании параметров этих сигналов оценивается расход среды через утечку. В зависимости от типа рабочей среды, проходного диаметра и рабочего давления запорной арматуры средняя погрешность расхода утечки может составлять от 0,1 до 20 л/мин.

В режиме тензометрии «UNISCOPE» проводит измерение НДС объекта в реальном масштабе времени. Важной особенностью работы в этом режиме является возможность его использовать совместно с АЭ измерениями для параметрического сопровождения контроля посредством наблюдения за изменением величины и характера нагружения. Для подключения резистивного моста в «UNISCOPE» использована шестипроводная схема, что позволяет проводить измерения НДС на удалении до 10 м от базового блока.

В режиме виброметрии «UNISCOPE» обеспечивает регистрацию общего уровня вибрации, мгновенных значений виброускорения и виброскорости. Также вычисляется – измерение уровня вибрации в стандартных полосах частот; временной сигнал в режиме осциллографа, пикфактор, широкополосный и узкополосный спектральный анализ вибрации, статистический анализ результатов периодических измерений.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРОМ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ КОНСТРУКЦИЙ

Прокофьев А.Б., Журавлев О.А., Миронова Т.Б.,
Жужукин А.И., Сергеев Р.Н.
СГАУ им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам разработки и анализа результатов применения помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра с непрерывным лазером как автоматизированной системы неразрушающего контроля и диагностики составных конструкций в виде секции вентиляционного канала и двух моделей пневмоклапанов. Диагностирование осуществляется с применением комплекса методов и средств неразрушающего контроля.

Диагностирование состояния производственного оборудования, а также оценка степени опасности повреждения на основе данных измерения вибрации и шума являются одним из наиболее действенных и целесообразных видов неразрушающего контроля. Особый интерес представляет использование бесконтактных автоматизированных лазерных виброметров панорамного типа, позволяющих производить измерения одновременно на значительных площадях для объектов любой формы и материалов. Создание средств вибрационного контроля данного класса стало возможным за счет развития методов корреляционной спекл-интерферометрии [1]. В полученных на их основе цифровых спекл-интерферометрах (ЦСИ) спеклограмма поверхности колеблющегося объекта образуется непосредственно в памяти компьютера, связанного с цифровой телевизионной камерой, установленной в выходном плече интерферометра.

В настоящее время наиболее приспособлены к решению задач вибродиагностики натуральных крупногабаритных конструкций лишь ЦСИ с импульсным лазером. Малая длительность формирования кадра (≤ 100 нс) в данных ЦСИ снимает требования к виброизоляции оптической схемы установки. Однако импульсные ЦСИ требуют априорной информации для количественной обработки спеклограмм, а сложность синхронизации лазерных импульсов с фазой колебаний объекта, необходимость применения специальных телекамер, высокая стоимость импульсного лазера и блока синхронизации, ограничивают их практическое применение.

Среди ЦСИ с непрерывным лазером следует выделить установки, работающие на основе метода усреднения во времени. Данные ЦСИ отличаются простотой схемного решения, дешевизной установки и высокой степенью автоматизации процесса регистрации. Указанные установки нашли широкое применение в процессе поузловой доводки авиационных двигателей, в частности, при исследовании динамических характеристик лопаток компрессора и турбины.

Обычно в ЦСИ с усреднением во времени спеклограмма формируется в ЭВМ методом вычитания по модулю двух спекл-изображений, получаемых при регулируемом сдвиге фазы опорного пучка [2]. Обеспечение точности фазового сдвига предъявляет повышенные требования к вибрационной защищенности оптической схемы таких установок. Применяя традиционные технологии создания виброзащиты, современные ЦСИ с непрерывным лазером сохранили присущие еще голографическим интерферометрам недостатки, связанные с большой металлоемкостью оптического стола, находящегося на воздушных подушках, и необходимостью размещения установок в подвальных помещениях или на специальном фундаменте. Но даже в этих условиях такие технологии ограничивают возможности применения ЦСИ с усреднением во времени для получения резонансных характеристик реальных конструкций и, тем более, исследования пульсационно-вибрационных процессов возбуждения колебаний технических систем.

Эти ограничения позволили снять разработанный в СГАУ программный метод повышения стабильности оптической схемы спекл-интерферометра с непрерывным лазером к случайным динамическим нагрузкам [3]. В результате был создан помехоустойчивый ЦСИ с лазером непрерывного излучения, впервые работающий без виброизоляции оптического стола. Испытания подтвердили высокие метрологические характеристики интерферометра, возможности применения его для исследования вибрационных характеристик сложных колебательных систем. К таким задачам относятся исследование многомодовых колебаний, когда объект возбуждается независимыми вибраторами [3], а также выделение нелинейных изменений конфигурации узловых полос колебаний объекта в потоке газа [4].

В настоящей работе рассматриваются вопросы применения разработанного и созданного помехоустойчивого ЦСИ для вибродиагностики составных конструкций: секция вентиляционного канала и пневматические клапаны прямого действия. Достоверность результатов исследования подтверждается данными численного моделирования и измерений доплеровским виброметром.

Литература

1. **Джоунс Р., Уайкс К.** Голографическая и спекл-интерферометрия. –М.: Мир, 1986. – 328 с.
2. **Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н.,** Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов // Известия Самарского центра РАН, 1999., №1. С. 134–136.
3. **Применение** методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций: Учебное пособие/ Д.С. Еленевский, О.А. Журавлёв, Ю.Н. Шапошников и др. Под ред. В.П. Шорина. Самара: СГАУ, 2005. – 193 с.
4. **Экспериментальное** исследование пульсационно-вибрационных процессов взаимодействия потока с конструкцией / О.А. Журавлев, С.Ю. Комаров, Ю.Н. Шапошников и др. // Вестник СГАУ, 2006., № 1. С. 69–76.

СЕКЦИЯ № 14. ВИБРОДИАГНОСТИКА

Руководители секции: Решетов А.А., Егоров А.В.

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Симчук А.А.

ООО «ГлобалТест», Саров Нижегородской обл., Россия

Несмотря на бурное развитие MEMS-технологий применительно к датчикам переменного давления, пьезоэлектрические датчики динамического давления (ПДДД) являются незаменимым средством измерений для жестких условий применения [1]. Важнейшими метрологическими характеристиками ПДДД являются коэффициент преобразования, динамический и частотный диапазоны. Проектирование ПДДД сопровождается необходимостью разрешения ряда компромиссов. Например, компромиссным является обеспечение с одной стороны, широкого динамического, с другой – частотного диапазона. Первое требование влечет за собой проектирование достаточно податливой мембраны для обеспечения линейности характеристики при низких давлениях, но достаточно прочной для обеспечения верхнего диапазона измеряемых давлений. Второе требование выполняется за счет увеличения жесткости мембраны и, соответственно, резонансной частоты и частотного диапазона измеряемых давлений.

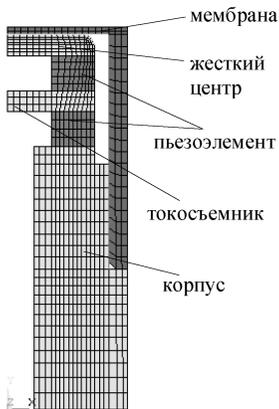


Рис. 1. Модель ПДДД

Для сокращения процесса проектирования целесообразно применение математического моделирования методом конечных элементов. На рис. 1 представлена конечноэлементная осесимметричная модель одной из конструкций ПДДД с реализацией контактов на границе элементов и условия упругопластичного поведения мембраны. Нагрузка в виде поля давления прикладывалась к верхней и боковой частям мембраны, что соответствует реальным условиям нагружения.

Целью моделирования являлась оптимизация методом конечных элементов [2, 3] конструкции ПДДД: материалов, толщины мембраны. Анализ проводился в условиях ограничений геометрических размеров конструкции.

Расчетные динамические диапазоны подтверждены для ряда конструкций ПДДД экспериментально. Указанный подход позволил оптимизировать ряд конструкций ПДДД с широким динамическим диапазоном. Разработаны и производятся датчики с диапазоном измерений от 0,001 до 250 бар, от 0,1 до 2500 бар с нелинейностью не более 2 % от полной шкалы.

Литература

1. Симчук А.А. «Датчики переменного давления», Мир измерений, 2011, №5(123). С. 36–41.
2. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. «ANSYS для инженеров. Справочное пособие», М., Машиностроение, 2004.
3. Басов К.А. «ANSYS. Справочник пользователя». – М.: ДМК-ПРЕСС, 2005.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Решетов А.А.

ГОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», Москва, Россия

Введение. Работа посвящена разработке и совершенствованию теоретических основ расчетно-экспериментальных методов и средств повышения эффективности вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования (в т.ч. газотранспортных систем). Рассмотрены решения задачи о собственных частотах и формах его колебаний по расчету уровней энергетических соотношений (функций чувствительности) элементов оборудования, которые обобщены в виде расчетных моделей [1, 2].

Основные результаты. Значительные трудности при определении коэффициентов демпфирования, а также то, что при малом демпфировании (это вполне справедливо для подавляющего большинства энергетического оборудования) собственные частоты и формы колебаний системы мало отличаются от частот и форм вынужденных колебаний в резонансных режимах, позволяют разработать методы и средства повышения эффективности вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования по результатам теоретического исследования свободных колебаний электро-, гидро- и механических систем.

Рассматривая математическую модель свободных колебаний системы любой природы, сложности, структуры и применяя метод Рэля можно записать выражения максимумов кинетической (магнитной) T_j^{\max} и

потенциальной (электрической) W_j^{\max} энергий, определить j -ю собственную частоту колебаний путем рассмотрения баланса энергии системы с n степенями $T_j^{\max} = W_j^{\max}$ при определенных допущениях относительно ее деформирования и функции чувствительности к проявлению дефектов (резонансным возбуждениям) для j -й собственной частоты колебаний при варьировании инерционных (индуктивных) и упругих (электрических емкостных) параметров электро-, гидро-, механической системы [2].

При использовании метода плоских вращений Якоби обычные формы колебаний (формы амплитуд обобщённых координат) исходной системы с n степенями свободы оказываются нормированными таким образом, что сумма всех относительных кинетических и потенциальных энергий элементов равна единице, поэтому такую нормировку называют *естественной*. Это позволяет упростить определение показателей чувствительности динамических характеристик на j -е собственные частоты колебаний.

Энергетические формы колебаний, представляющие собой вертикальные отрезки, отложенные от соответствующего инерционного или упругого элемента системы, наглядно показывают уровень врождённой чувствительности элементов к появлению и развитию повреждений.

Для распознавания зарождающихся дефектов, проявляющихся в резонансных режимах; прогнозирования зарождающихся дефектов по структуре изделия; сокращения области поиска возможных повреждений оборудования и повышения надежности обнаружения дефектов разработаны расчетно-экспериментальные методы вибро-диагностического контроля энергомеханического оборудования [2]:

- метод тестового вибродиагностического контроля для анализа свободных колебаний системы;
- метод вибродиагностического контроля энергетического оборудования на основе показателей чувствительности узлов к возбуждающим колебаниям воздействиям.

В отличие от существующих методов вибродиагностического НК предлагаемые методы основаны на применении расчетных спектральных «портретов» объекта диагностирования, существенно облегчающих прогнозирование зарождающихся дефектов по структуре изделия. Инерционные характеристики задаются в простейших случаях списками инерционных элементов, отражающих вращательные движения тел вращений. Линейные силы упругости описываются упругими элементами. Введенные таким образом элементы и твердые тела имеют в своем составе геометрическую (кинематическую) и физическую части. Первая включает переменные (координаты), описывающие обобщенные координаты и

перемещения объектов механической модели, вторая отражает физические характеристики – инерционные и упругие свойства (определяемые по компьютерной программе).

Для вынесения заключения об отсутствии или наличии дефекта, а также его развитии необходимо сравнить расчетную априорную информацию (расчетный спектральный «портрет», определяемый по компьютерной программе) с апостериорным спектральным «портретом» на основе виброакустического канала.

Теоретические основы предложенных методов и средств повышения эффективности вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования (в т.ч. газо-транспортных систем) составляют решения задачи о собственных частотах и формах его колебаний путем расчета уровней энергетических соотношений (функций чувствительности) элементов оборудования по компьютерной программе. На основании полученных решений этой задачи определяются зависимости спектральных «портретов» от параметров объектов диагностирования (математических и физических), расчетные спектральные «портреты» рассматриваются в качестве априорного базиса проектируемой системы технической диагностики различного энергомеханического оборудования, и выбираются режимы его вибродиагностического контроля.

Обсуждение результатов.

Известно, что в области вибродиагностического НК энергетического оборудования широко используются методы, средства и стандарты, основанные на контроле и анализе изгибных и продольных колебаний валопроводов (которые передаются на опорные узлы). Для этого применяются преобразователи относительной вибрации (вихретоковые, индуктивные и др.), преобразователи абсолютной вибрации (пьезоэлектрические, электродинамические и др.) [1, 2]. При этом теория и практика эксплуатации оборудования показывают, что именно виброакустические сигналы крутильных колебаний валопроводов содержат сведения о зарождении и проявлении многих дефектов узлов энергомеханического оборудования. Поэтому в целях повышения эффективности вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования необходимо применять информативные параметры крутильных колебаний валопровода.

Уровень амплитуд вынужденных колебаний (отклик системы на зарождение дефекта) определяется энергетической чувствительностью к возбуждению (значением функций чувствительности), размерами дефектов, уровнем демпфирования в системе и отстройкой её собственных частот колебаний от частот возмущения.

Достоверность предложенных методов и средств подтверждена соответствием основных научных положений и выводов с экспериментальными результатами при вибродиагностическом контроле промышленных тракторов, дизель-генераторов и судовых энергетических установок на базе дизе-

лей семейства ЧН16.5/18.5, питательных центробежных насосов с асинхронным электроприводом, погружных центробежных насосов для добычи нефти с асинхронным электроприводом, газоперекачивающих агрегатов и других объектов в целях распознавания зарождающихся дефектов, указания по структуре изделий повреждения узлов, определения причин дефектов, аварий и повышения уровня надёжности энергетического оборудования.

Литература

1. **Неразрушающий контроль:** справ.: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003–2005.

2. **Решетов А.А.** Незарушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов: учеб. пособие / А.А. Решетов, А.К. Аракелян; под ред. проф. А.К. Аракеяна. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – 470 с.

ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Егоров А.В.

ГОУ ВПО «МарГТУ», Йошкар-Ола, Россия

Рассмотрим кинематическую схему заднеприводного 4-х колесного автотранспортного средства (рис. 1).

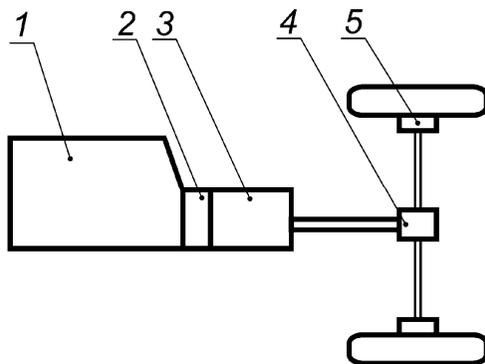


Рис. 1. Кинематическая схема заднеприводного 4-х колесного автотранспортного средства:

1 – ДВС; 2 – сцепление; 3 – коробка перемены передач; 4 – главная передача;
5 – бортовой редуктор

Полагая, что ДВС через кинематическую схему должен сообщать механическую энергию необходимую для раскрутки четырех колес, каждое из которых имеет массу m_k , радиус с учетом деформации шины $r_{ш}$ и на каждое из которых в первом приближении приходится по 1/4 массы автомобиля с водителем M_a и массы $M_{гр}$ груза (в случае конкретного автомобиля и его загрузки это соотношение принимает другие значения), необходимо определение приведенного к оси вращения коленчатого вала момента инерции.

Из условия неизменности кинетической энергии следует, что для системы, состоящей из соединенных через зубчатые передачи ДВС и вращающихся с угловой скоростью ω_k четырех колес, обладающих с учетом трения качения по поверхности и трения скольжения в опорах суммарным моментом инерции J_{Σ_k} , с учетом скорости движения автомобиля $V_a = \omega_k r_{ш}$ и полагая пренебрежимо малыми, по-сравнению с остальными, действие воздушного сопротивления движению,

$$J_{пр}(\omega) \frac{\omega_{дв}^2}{2} = J_{дв}(\omega) \frac{\omega_{дв}^2}{2} + J_{тр}(\omega) \frac{\omega_{дв}^2}{2} + J_{\Sigma_k}(\omega) \frac{\omega_k^2}{2} + (M_a + M_{гр}) \frac{V_a^2}{2}, \quad (1)$$

где $J_{тр}(\omega)$ – приведенный к оси вращения коленчатого вала момент инерции агрегатов трансмиссии.

Искомый приведенный момент инерции системы:

$$J_{пр}(\omega) = J_{дв}(\omega) + J_{тр}(\omega) + J_{\Sigma_k}(\omega) \left(\frac{\omega_k}{\omega_{дв}} \right)^2 + \frac{(M_a + M_{гр})V_a^2}{\omega_{дв}^2}. \quad (2)$$

Передаточное отношение между ДВС и ведущим колесом равно произведению передаточного отношения коробки перемены передач (КПП) $k_{КПП}$, передаточного отношения главной передачи (ГП) $k_{ГП}$ и, в случае наличия бортового редуктора (БР), передаточного отношения БР ($k_{БР}$).

Тогда (2) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} J_{пр}(\omega) &= J_{дв}(\omega) + J_{тр}(\omega) + J_{\Sigma_k}(\omega) \left(\frac{1}{k_{КПП}k_{ГП}k_{БР}} \right)^2 + \frac{(M_a + M_{гр})V_a^2}{\omega_{дв}^2} = \\ &= J_{дв}(\omega) + J_{тр}(\omega) + \left(J_{\Sigma_k}(\omega) + (M_a + M_{гр})r_{ш}^2 \right) \cdot \left(\frac{1}{k_{КПП}k_{ГП}k_{БР}} \right)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Зависимость крутящего момента на ведущих колесах от частоты вращения коленчатого вала двигателя, выраженная через угловые ускорения коленчатого вала и приведенный к оси вращения коленчатого вала момент инерции вращающихся масс транспортного средства определяется:

$$M(\omega) = J_{\text{пр}}(\omega)\varepsilon(\omega) = \left[J_{\text{дв}}(\omega) + J_{\text{тр}}(\omega) + \left(\frac{J_{\Sigma_k} + (M_a + M_{\text{гр}})r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2} \right) \right] \varepsilon(\omega). \quad (4)$$

Расчетное уравнение крутящего момента при разгоне автомобиля с водителем при работе двигателя по внешней характеристике (акселератор нажат до упора):

$$M(\omega) = \left[J_{\text{дв}}(\omega) + J_{\text{тр}}(\omega) + \left(\frac{J_{\Sigma_k} + M_a r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2} \right) \right] \varepsilon_1(\omega), \quad (5)$$

где $\varepsilon_1(\omega)$ – угловое ускорение коленчатого вала двигателя при разгоне автомобиля только водителем.

Расчетное уравнение крутящего момента при разгоне автомобиля с водителем и грузом при работе двигателя по внешней характеристике (акселератор нажат до упора):

$$M(\omega) = \left[J_{\text{дв}}(\omega) + J_{\text{тр}}(\omega) + \left(\frac{J_{\Sigma_k} + (M_a + M_{\text{гр}})r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2} \right) \right] \varepsilon_2(\omega), \quad (6)$$

где $\varepsilon_2(\omega)$ – угловое ускорение коленчатого вала двигателя при разгоне автомобиля с водителем и грузом массой $M_{\text{гр}}$.

Приравнивая (5) и (6) определяем сумму:

$$J_{\text{дв}}(\omega) + J_{\text{тр}}(\omega) = \frac{M_{\text{гр}} r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2} \cdot \frac{\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)} - \frac{J_{\Sigma_k} + M_a r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5) строим характеристику крутящего момента на ведущих колесах:

$$M(\omega) = \frac{M_{\text{гр}} r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2} \cdot \frac{\varepsilon_1(\omega)\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)}. \quad (8)$$

Подставляя (7) в (6) строим характеристику крутящего момента на ведущих колесах:

$$M(\omega) = \frac{M_{\text{гр}} r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2} \cdot \frac{\varepsilon_1(\omega)\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)}. \quad (9)$$

Полезная механическая мощность на ведущих колесах:

$$N(\omega) = M(\omega)\omega = \frac{M_{\text{гр}} r_{\text{ш}}^2}{k_{\text{КПП}}^2 k_{\text{ГП}}^2 k_{\text{БР}}^2} \cdot \frac{\varepsilon_1(\omega)\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)} \omega. \quad (10)$$

Осуществляя параллельный замер массового расхода топлива $Q(\omega)$ при измерении $\varepsilon_1(\omega)$ или $\varepsilon_2(\omega)$ (в идеальном случае расходы должны совпадать) и зная теплотворную способность топлива q_m определяем зависимость эффективного коэффициента полезного действия колесного автотранспортного средства:

$$\eta(\omega) = \frac{N(\omega)}{Q(\omega)q_m}. \quad (11)$$

ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Егоров А.В.
ГОУ ВПО «МарГТУ», Йошкар-Ола, Россия

Рассмотрим кинематическую схему гусеничной машины (рис. 1). ДВС 1 соединен с ведущими звездочками b , радиусами $r_{\text{вз}}$, посредством агрегатов трансмиссии и бортовых редукторов. Передаточное отношение КПП на соответствующей передаче – $k_{\text{КПП}}$, передаточное отношение главной передачи (ГП) – $k_{\text{ГП}}$, передаточное отношение дифференциала (ДИФ) – $k_{\text{ДИФ}}$, передаточное отношение бортового редуктора (БР) – $k_{\text{БР}}$.

Вес гусеничной машины, массой $M_{\text{гм}}$ (с учетом массы водителя), воспринимается роликами кареток δ , имеющими радиус $r_{\text{рк}}$. Натяжение гусеничной цепи осуществляется колесом натяжного механизма 10 , имеющим радиус $r_{\text{кнм}}$, поддержка гусеничной цепи – поддерживающими роликами радиусом $r_{\text{пр}}$. Длина каждой гусеничной цепи – $l_{\text{гц}}$, толщина гусеничной цепи – $h_{\text{гц}}$, вес одного погонного метра $m_{\text{гц}}$. Угол обхвата гусеничной цепью ведущей звездочки $\alpha_{\text{вз}}$, угол обхвата гусеничной цепью колеса натяжного механизма $\alpha_{\text{нм}}$.

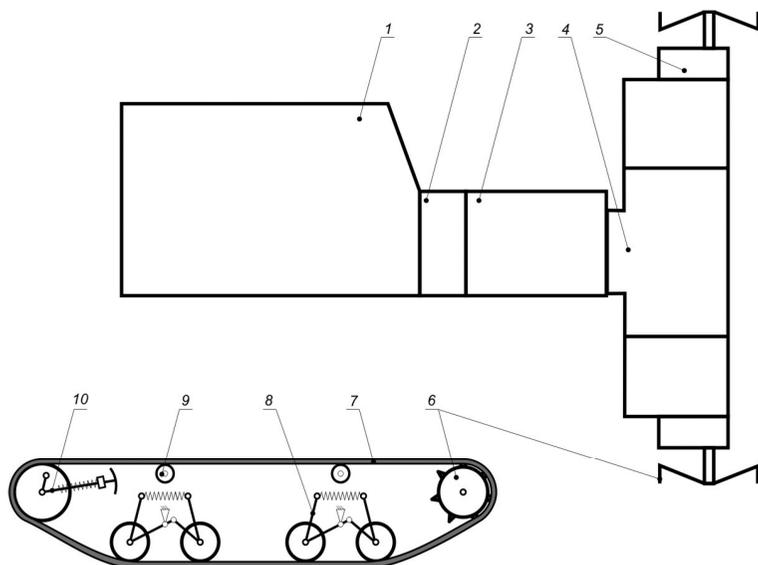


Рис. 1. Кинематическая схема гусеничной машины:

- 1 – ДВС; 2 – сцепление; 3 – коробка перемены передач;
 4 – задний мост с главной передачей и дифференциальным механизмом;
 5 – бортовой редуктор; 6 – ведущая звездочка; 7 – гусеничная цепь; 8 – каретка;
 9 – поддерживающий ролик; 10 – натяжной механизм

На основе закона сохранения кинетической энергии:

$$\begin{aligned}
 J_{\text{пр}}(\omega) \frac{\omega_{\text{ДВ}}^2}{2} = & J_{\text{ДВ}}(\omega) \frac{\omega_{\text{ДВ}}^2}{2} + J_{\text{тр}}(\omega) \frac{\omega_{\text{ДВ}}^2}{2} + J_{\text{в3}} \omega_{\text{в3}}^2 + J_{\text{кнм}} \omega_{\text{кнм}}^2 + J_{\text{рк}} \frac{\omega_{\text{рк}}^2}{2} x + \\
 & + J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{пр}}^2}{2} y + M_{\text{ГМ}} \frac{V_{\text{ГМ}}^2}{2} + \alpha_{\text{в3}} \left(r_{\text{в3}} + \frac{h_{\text{ГЦ}}}{2} \right) m_{\text{ГЦ}} \left(r_{\text{в3}} + \frac{h_{\text{ГЦ}}}{2} \right)^2 \frac{\omega_{\text{в3}}^2}{2} + \\
 & + \alpha_{\text{кнм}} \left(r_{\text{кнм}} + \frac{h_{\text{ГЦ}}}{2} \right) m_{\text{ГЦ}} \left(r_{\text{кнм}} + \frac{h_{\text{ГЦ}}}{2} \right)^2 \frac{\omega_{\text{кнм}}^2}{2} + (I_{\text{ГЦ}} - \alpha_{\text{в3}} \left(r_{\text{в3}} + \frac{h_{\text{ГЦ}}}{2} \right) - \\
 & - \alpha_{\text{рк}} \left(r_{\text{рк}} + \frac{h_{\text{ГЦ}}}{2} \right) m_{\text{ГЦ}} V_{\text{ГМ}}^2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\omega_{\text{в3}}$, $\omega_{\text{кнм}}$, $\omega_{\text{рк}}$, $\omega_{\text{пр}}$ – угловые скорости ведущей звездочки, колеса натяжного механизма, ролика каретки, поддерживающего ролика;
 x, y – количество роликов каретки и поддерживающих роликов, установленных на гусеничную машину.

Угловые скорости колеса натяжного механизма, ролика каретки, поддерживающего ролика связаны с угловой скоростью ведущей звездочки ($\omega_{вз} = \omega_{дв} / (k_{кпп} k_{гп} k_{диф} k_{бр})$) через линейную скорость гусеничной машины $V_{гм} = \omega_{вз} r_{вз}$ и, соответственно, равны:

$$\omega_{кнм} = \omega_{вз} \frac{r_{вз}}{r_{кнм}}, \quad \omega_{рк} = \omega_{вз} \frac{r_{вз}}{r_{рк}}, \quad \omega_{нр} = \omega_{вз} \frac{r_{вз}}{r_{нр}}. \quad (2)$$

Искомый приведенный момент инерции системы:

$$\begin{aligned} J_{нр}(\omega) = & J_{дв}(\omega) + J_{нр}(\omega) + \frac{2J_{вз}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} + \frac{2J_{кнм}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{кнм}^2} + \\ & + \frac{J_{рк}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{рк}^2} x + \frac{J_{нр}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{нр}^2} y + M_{зм} \frac{r_{вз}^2}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} + \\ & + \frac{\alpha_{вз} m_{зц}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \left(r_{вз} + \frac{h_{зц}}{2}\right)^3 + \frac{\alpha_{кнм} m_{зц}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{кнм}^2} \left(r_{кнм} + \frac{h_{зц}}{2}\right)^3 + \\ & + \left(l_{зц} - \alpha_{вз} \left(r_{вз} + \frac{h_{зц}}{2}\right) - \alpha_{нк} \left(r_{нк} + \frac{h_{зц}}{2}\right)\right) m_{зц} \frac{r_{вз}^2}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Очевидно, что основной весовой вклад в $J_{нр}(\omega)$ делает масса гусеничной машины $M_{зм}$.

Зависимость крутящего момента, преобразуемого в тяговые усилия гусениц от частоты вращения коленчатого вала двигателя:

$$M(\omega) = J_{нр}(\omega) \varepsilon(\omega) =$$

$$\begin{aligned} & \left[J_{дв}(\omega) + J_{нр}(\omega) + \frac{2J_{вз}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} + \frac{2J_{кнм}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{кнм}^2} + \right. \\ & + \frac{J_{рк}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{рк}^2} x + \frac{J_{нр}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{нр}^2} y + \\ & + M_{зм} \frac{r_{вз}^2}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} + \frac{\alpha_{вз} m_{зц}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \left(r_{вз} + \frac{h_{зц}}{2}\right)^3 + \\ & + \frac{\alpha_{кнм} m_{зц}}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{кнм}^2} \left(r_{кнм} + \frac{h_{зц}}{2}\right)^3 + \\ & \left. + \left(l_{зц} - \alpha_{вз} \left(r_{вз} + \frac{h_{зц}}{2}\right) - \alpha_{нк} \left(r_{нк} + \frac{h_{зц}}{2}\right)\right) m_{зц} \frac{r_{вз}^2}{k_{кпп}^2 k_{гп}^2 k_{диф}^2 k_{бр}^2} \right] \varepsilon(\omega) \quad (4) \end{aligned}$$

Расчетное уравнение крутящего момента при разгоне гусеничной машины с водителем при работе двигателя по внешней характеристике (акселератор нажат до упора):

$$M(\omega) = J_{np}(\omega)\varepsilon_1(\omega) =$$

$$\left[\begin{aligned} & J_{\delta\omega}(\omega) + J_{mp}(\omega) + \frac{2J_{\omega_3}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} + \frac{2J_{КНМ}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{КНМ}^2} + \\ & + \frac{J_{рк}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{рк}^2} x + \frac{J_{np}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{np}^2} y + \\ & + M_{zm} \frac{r_{\omega_3}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} + \frac{\alpha_{\omega_3} m_{zц}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} (r_{\omega_3} + \frac{h_{zц}}{2})^3 + \\ & + \frac{\alpha_{КНМ} m_{zц}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{КНМ}^2} (r_{КНМ} + \frac{h_{zц}}{2})^3 + \\ & + (l_{zц} - \alpha_{\omega_3} (r_{\omega_3} + \frac{h_{zц}}{2}) - \alpha_{нк} (r_{нк} + \frac{h_{zц}}{2})) m_{zц} \frac{r_{\omega_3}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \end{aligned} \right] \varepsilon_1(\omega), \quad (5)$$

где $\varepsilon_1(\omega)$ – угловое ускорение коленчатого вала двигателя при разгоне гусеничной машины только с водителем.

Расчетное уравнение крутящего момента при разгоне гусеничной машины с водителем и грузом массой $M_{гр}$ при работе двигателя по внешней характеристике (акселератор нажат до упора):

$$M(\omega) = J_{np}(\omega)\varepsilon_2(\omega) =$$

$$\left[\begin{aligned} & J_{\delta\omega}(\omega) + J_{mp}(\omega) + \frac{2J_{\omega_3}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} + \frac{2J_{КНМ}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{КНМ}^2} + \\ & + \frac{J_{рк}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{рк}^2} x + \frac{J_{np}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{np}^2} y + \\ & + (M_{zm} + M_{gp}) \frac{r_{\omega_3}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} + \frac{\alpha_{\omega_3} m_{zц}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} (r_{\omega_3} + \frac{h_{zц}}{2})^3 \\ & + \frac{\alpha_{КНМ} m_{zц}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{\omega_3}^2}{r_{КНМ}^2} (r_{КНМ} + \frac{h_{zц}}{2})^3 + \\ & + (l_{zц} - \alpha_{\omega_3} (r_{\omega_3} + \frac{h_{zц}}{2}) - \alpha_{нк} (r_{нк} + \frac{h_{zц}}{2})) m_{zц} \frac{r_{\omega_3}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{Диф}^2 k_{БР}^2} \end{aligned} \right] \varepsilon_2(\omega), \quad (6)$$

где $\varepsilon_2(\omega)$ – угловое ускорение коленчатого вала двигателя при разгоне гусеничной машины с водителем и грузом массой $M_{гр}$.

Приравнявая (5) и (6) определяем сумму:

$$J_{дв}(\omega) + J_{гр}(\omega) = M_{зр} \frac{r_{вз}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \cdot \frac{\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)} -$$

$$\left[\begin{aligned} & \frac{2J_{вз}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} + \frac{2J_{кнм}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{кнм}^2} + \\ & + \frac{J_{рк}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{рк}^2} x + \frac{J_{нр}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{нр}^2} y + \\ & + M_{зм} \frac{r_{вз}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} + \frac{\alpha_{вз} m_{зц}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} (r_{вз} + \frac{h_{зц}}{2})^3 + \\ & + \frac{\alpha_{кнм} m_{зц}}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \frac{r_{вз}^2}{r_{кнм}^2} (r_{кнм} + \frac{h_{зц}}{2})^3 + \\ & + (I_{зц} - \alpha_{вз} (r_{вз} + \frac{h_{зц}}{2}) - \alpha_{нк} (r_{нк} + \frac{h_{зц}}{2})) m_{зц} \frac{r_{вз}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \end{aligned} \right] \cdot \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5) строим характеристику крутящего момента, создающего тяговое усилие на гусеницах:

$$M(\omega) = M_{гр} \frac{r_{вз}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \cdot \frac{\varepsilon_1(\omega) \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)}. \quad (8)$$

Подставляя (7) в (6) строим характеристику крутящего момента, создающего тяговое усилие на гусеницах:

$$M(\omega) = M_{гр} \frac{r_{вз}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \cdot \frac{\varepsilon_1(\omega) \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)}. \quad (9)$$

Полезная механическая мощность на гусеницах:

$$N(\omega) = M(\omega) \omega = M_{гр} \omega \frac{r_{вз}^2}{k_{КПП}^2 k_{ГП}^2 k_{ДИФ}^2 k_{БР}^2} \cdot \frac{\varepsilon_1(\omega) \varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)}. \quad (10)$$

Осуществляя параллельный замер массового расхода топлива $Q(\omega)$ при измерении $\varepsilon_1(\omega)$ или $\varepsilon_2(\omega)$ (в идеальном случае расходы должны совпадать) и зная теплотворную способность топлива q_m определяем зависимость эффективного коэффициента полезного действия гусеничного транспортного средства:

$$\eta(\omega) = \frac{N(\omega)}{Q(\omega)q_m}. \quad (11)$$

ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМЕННЫХ И ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ

Егоров А.В.

ГОУ ВПО «МарГТУ», Йошкар-Ола, Россия

Рассмотрим элементарную ременную передачу (рис. 1). Предположим, что момент инерции ведущего шкива (радиусом r_1) равен J_1 , а момент инерции ведомого шкива (радиусом r_2) равен J_2 , расстояние между осями шкивов равно a . Определим моменты инерции тех частей ремня, которые обхватывают ведущий и ведомый шкивы относительно осей вращения соответствующих шкивов. Для этого определим значение угла β :

$$\frac{\beta}{2} = \arctg \frac{r_2 - r_1}{a}. \quad (1)$$

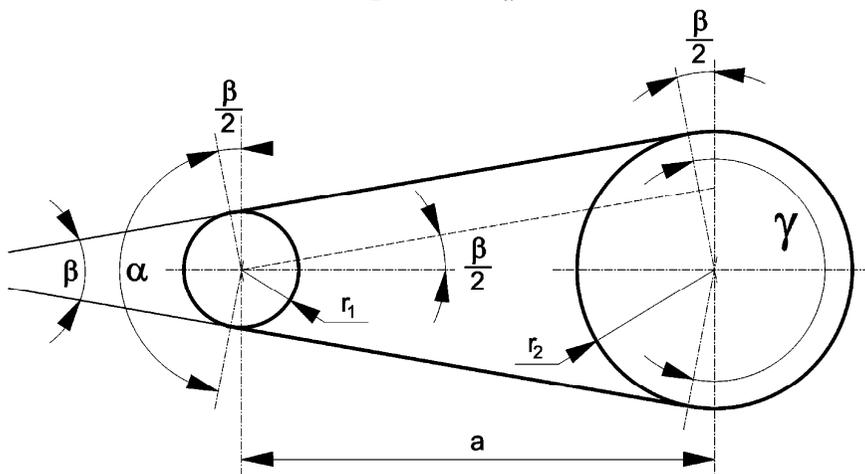


Рис. 1. Схема ременной передачи

Угол обхвата ведущего шкива:

$$\alpha = 180 - \beta. \quad (2)$$

Угол обхвата ведомого шкива:

$$\gamma = 180 + \beta. \quad (3)$$

С учетом толщины ремня h длина окружности обхвата ведущего шкива по средней линии ремня:

$$l_1 = \alpha(r_1 + h/2). \quad (4)$$

С учетом толщины ремня h длина окружности обхвата ведущего шкива по средней линии ремня:

$$l_2 = \alpha(r_2 + h/2). \quad (5)$$

Зная удельную массу единицы длины ремня m и расстояние от средней линии ремня до оси вращения соответствующего шкива определяем значения момента инерции охватывающего соответствующий шкив части ремня.

Момент инерции части ремня, охватывающей ведущий шкив, относительно оси его вращения:

$$J_{p1} = ml_1(r_1 + h/2)^2. \quad (6)$$

Момент инерции части ремня, охватывающей ведомый шкив, относительно оси его вращения:

$$J_{p2} = ml_2(r_2 + h/2)^2. \quad (7)$$

Общая длина ремня равна L .

Запишем закон сохранения механической энергии для ременной передачи, имеющей прямой привод от электрического двигателя:

$$J_{np0} \frac{\omega^2}{2} = (J_p + J_{мгэд} + J_1 + J_{мг1} + J_{p1} + J_{npм}) \frac{\omega^2}{2} + (J_2 + J_{мг2} + J_{p2}) \frac{\omega^2 r_1^2}{r_2^2} + E_{к1} + E_{к2}, \quad (8)$$

где J_{np0} – приведенный к оси вращения ротора электрического двигателя момент инерции всех вращающихся масс всего ременного привода, отключенного от потребителя мощности;

J_p – момент инерции ротора электрического двигателя, определенный методом крутильных колебаний (ГОСТ 7217–87) с учетом момента инерции внутренних колец подшипников качения;

$J_{мнэд}$ – приведенный к оси вращения ротора электрического двигателя момент инерции механических потерь в подшипниках качения электрического двигателя;

$J_{мн1}$ и $J_{мн2}$ – приведенные к оси вращения ротора электрического двигателя моменты инерции механических потерь в опорах ведущего и ведомого шкивов соответственно;

$J_{нрм}$ – приведенный к оси вращения ротора электрического двигателя момент инерции потерь при работе ременной передачи (потери на внутренне трение в ремне и в паре ремень-шкивы, потери на деформации изгиба, потери от сопротивления воздуха движению ремня и шкивов);

$E_{к1} = E_{к2} = \frac{L - l_1 - l_2}{2} m \frac{(\omega r_1)^2}{2}$ – кинетическая энергия ведущей и ведомой частей ремня соответственно.

Приведенный к оси ротора электрического двигателя момент инерции ременного привода:

$$J_{np0} = (J_p + J_{мнэд} + J_1 + J_{мн1} + J_{p1} + J_{нрм}) + (J_2 + J_{мн2} + J_{p2})r_1^2/r_2^2 + (L - l_1 - l_2)mr_1^2. \quad (9)$$

Аналогично методу стендового инерционного определения момента инерции вращающихся масс двигателей вращательного действия измеряем динамику угловых ускорений ε_0 ременного привода на холостом ходу или под нагрузкой. Крутящий момент, развиваемый ротором электрического двигателя при этом определится как:

$$M = J_{np0}\varepsilon_0. \quad (10)$$

Затем, например, на приводной вал ведущего шкива устанавливаем тело обладающее эталонным моментом инерции J_3 . Тогда приведенный к оси вращения ротора электрического двигателя момент инерции составит:

$$J_{np1} = (J_p + J_{мнэд} + J_1 + J_{мн1} + J_{p1} + J_{нрм} + J_3) + (J_2 + J_{мн2} + J_{p2})r_1^2/r_2^2 + (L - l_1 - l_2)mr_1^2. \quad (11)$$

Крутящий момент, развиваемый ротором электрического двигателя при этом определится как:

$$M = J_{np1}\varepsilon_1 = J_{np0}\varepsilon_1 + J_{np\varepsilon}\varepsilon_1. \quad (12)$$

Приравнявая два последних выражения для крутящего момента определяем приведенный момент инерции потерь при работе ременной передачи:

$$J_{np0} = \frac{J_3\varepsilon_1}{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}. \quad (13)$$

Приравнявая правые части выражений для определения J_{np0} определяем приведенный к оси вращения ротора электрического двигателя момент инерции потерь при работе ременной передачи:

$$J_{npм} = J_{np0} - \left[J_p + J_{мп\varepsilon 0} + J_1 + J_{мп1} + J_{p1} + (J_2 + J_{мп2} + J_{p2})r_1^2/r_2^2 + (L-l_1-l_2)m_k^2 \right] \quad (14)$$

или

$$J_{npм} = \frac{J_3\varepsilon_1}{\varepsilon_0 - \varepsilon_1} - \left[J_p + J_{мп\varepsilon 0} + J_1 + J_{мп1} + J_{p1} + (J_2 + J_{мп2} + J_{p2})r_1^2/r_2^2 + (L-l_1-l_2)m_k^2 \right]. \quad (15)$$

Таким образом, используя тела с эталонным моментом инерции можно оценивать влияние отдельных факторов на энергоэффективность работы ременной передачи в широком диапазоне режимов работы.

ИНЕРЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Егоров А.В., Зверев С.В.
ГОУ ВПО «МарГТУ», Йошкар-Ола, Россия

Представим реализацию метода более подробно. На рис. 1 представлена схема одноступенчатого зубчатого редуктора с электроприводом от асинхронного электродвигателя.

Зная расчетный или экспериментально определенный методом крутильных колебаний момент инерции $J_{пм\varepsilon}$ предохранительной муфты электродвигателя 2 определяется момент инерции $J_{\text{азд}}$ ротора асинхронного электродвигателя 1 с учетом потерь на трение в его опорах.

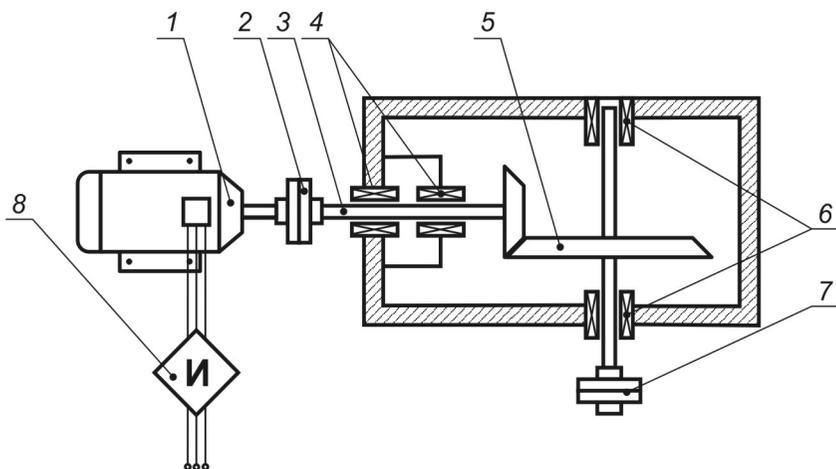


Рис. 1. Схема зубчатого редуктора с электроприводом от асинхронного электродвигателя:

1 – асинхронный электродвигатель; 2 – предохранительная муфта электродвигателя; 3 – быстроходный вал-шестерня; 4 – опорные подшипники быстроходного вала; 5 – тихоходный вал с надетым на него зубчатым колесом; 6 – опорные подшипники тихоходного вала; 7 – предохранительная муфта редуктора; 8 – частотный преобразователь

Сначала производится определение динамики угловых ускорений ротора с установленной на выходном валу предохранительной муфтой электродвигателя $\varepsilon_1(\omega)$, а затем без нее $\varepsilon_2(\omega)$. Составляющие крутящего момента, моменты инерции и угловые ускорения, при первом и втором разгоне могут быть приравнены друг другу:

$$(J_{\text{пмэ}} + J_{\text{азд}}(\omega))\varepsilon_1(\omega) = J_{\text{азд}}(\omega)\varepsilon_2(\omega). \quad (1)$$

Из (1) рассчитывается зависимость момента инерции ротора электродвигателя с учетом потерь на трение в опорах:

$$J_{\text{азд}}(\omega) = J_{\text{пмэ}}\varepsilon_1(\omega)/(\varepsilon_2(\omega) - \varepsilon_1(\omega)). \quad (2)$$

На втором этапе асинхронный электродвигатель 1 подвергается разбору и из него извлекается ротор. Затем, методом крутильных колебаний, используя в качестве эталона предохранительную муфту электродвигателя 2 с моментом инерции $J_{\text{пмэ}}$, определяют момент инерции ротора асинхронного электродвигателя $J_{\text{разд}}$.

Зная динамику $J_{\text{аэд}}(\omega)$ и значение $J_{\text{разд}}$ можно определить динамику приведенного момента инерции потерь в подшипниковых узлах $J_{\text{ппуаэд}}(\omega)$ асинхронного электродвигателя 1:

$$J_{\text{ппуаэд}}(\omega) = J_{\text{аэд}}(\omega) - J_{\text{разд}} \quad (3)$$

Взяв массив $\varepsilon_2(\omega)$, массив угловых скоростей ω и умножив на соответствующие значения и массивы $J_{\text{разд}}$, $J_{\text{ппуаэд}}(\omega)$, $J_{\text{аэд}}(\omega)$ получим динамику механической мощности, развиваемой ротором электродвигателя $N_{\text{разд}}(\omega)$, динамику мощности потерь в подшипниковых узлах асинхронного электродвигателя $N_{\text{ппуаэд}}(\omega)$, динамику эффективной механической мощности асинхронного электродвигателя $N_{\text{аэд}}(\omega)$.

Динамика крутящего момента на выходе предохранительной муфты электродвигателя 2:

$$M(\omega) = (J_{\text{аэд}}(\omega) + J_{\text{пмэ}}) \varepsilon_1(\omega) . \quad (4)$$

На третьем этапе, разобрав редуктор и используя в качестве эталона предохранительную муфту электродвигателя 2 с моментом инерции $J_{\text{пмэ}}$, методом крутильных колебаний определяем момент инерции вала-шестерни 3 $J_{\text{вщ}}$.

На четвертом этапе редуктор собирается без тихоходного вала, а вал шестерня 3 через предохранительную муфту электродвигателя 2 соединяется с выходным валом асинхронного электродвигателя 1 и определяется динамика угловых ускорений $\varepsilon_3(\omega)$ системы «асинхронный электродвигатель 1 – предохранительная муфта электродвигателя 2 – вал-шестерня 3». Динамика крутящего момента системы вращающихся масс определяется как:

$$M(\omega) = (J_{\text{аэд}}(\omega) + J_{\text{пмэ}} + J_{\text{вщ}}(\omega)) \varepsilon_3(\omega) , \quad (5)$$

где $J_{\text{вщ}}(\omega)$ – динамика момент инерции вала шестерни с учетом потерь на трение в опорах.

Зная динамику $J_{\text{вщ}}(\omega)$ и значение $J_{\text{вщ}}$ можно определить динамику приведенного момента инерции потерь в $J_{\text{попвщ}}(\omega)$ в опорных подшипниках 4 быстроходного вала-шестерни 3:

$$J_{\text{попвщ}}(\omega) = J_{\text{вщ}}(\omega) - J_{\text{вщ}} . \quad (6)$$

Динамика мощности потерь в опорных подшипниках быстроходного вала-шестерни 4:

$$N_{\text{попвш}}(\omega) = J_{\text{попвш}}(\omega)\varepsilon_3(\omega)\omega. \quad (7)$$

На пятом этапе, используя в качестве эталона предохранительную муфту редуктора 7 с моментом инерции $J_{\text{пмр}}$, методом крутильных колебаний определяем момент инерции тихоходного вала с надетым на него зубчатым колесом $J_{\text{тв}}$.

На шестом этапе редуктор собирается без быстроходного вала, а тихоходный вал с надетым на него зубчатым колесом 5 через предохранительную муфту редуктора 7 соединяется с выходным валом асинхронного электродвигателя 1. При этом с помощью частотного преобразователя 8 устанавливается такая частота питающего напряжения электродвигателя 1, чтобы тихоходный вал развивал такую же максимальную угловую скорость, как и в случае его привода со стороны быстроходного вала-шестерни. Затем асинхронный электродвигатель 1 запускается и определяется динамика угловых ускорений $\varepsilon_4(\omega)$ системы «асинхронный электродвигатель 1 – предохранительная муфта редуктора 7 – тихоходный вал 5». Динамика крутящего момента системы вращающихся масс определяется как:

$$M(\omega) = (J_{\text{азд}}(\omega) + J_{\text{пмр}} + J_{\text{тв}}(\omega))\varepsilon_4(\omega), \quad (8)$$

где $J_{\text{тв}}(\omega)$ – динамика момента инерции тихоходного вала с учетом потерь в опорах тихоходного вала.

Зная динамику $J_{\text{тв}}(\omega)$ и значение $J_{\text{тв}}$ можно определить динамику приведенного момента инерции потерь в $J_{\text{поптв}}(\omega)$ в опорных подшипниках 4 тихоходного вала 5:

$$J_{\text{поптв}}(\omega) = J_{\text{тв}}(\omega) - J_{\text{тв}}. \quad (9)$$

Динамика мощности потерь в опорных подшипниках тихоходного вала 5:

$$N_{\text{лоптв}}(\omega) = J_{\text{поптв}}(\omega)\varepsilon_4(\omega)\omega. \quad (10)$$

На седьмом этапе полностью собирают, а асинхронный электродвигатель 1 снова подсоединяют к быстроходному валу-шестерне 3 через предохранительную муфту электродвигателя 2. С помощью преобразователя частоты меняют уменьшают частоту питающего напряжения до номинальной,

при которой асинхронный электродвигатель I разовьет номинальную частоту вращения. Определяют суммарный приведенный момент инерции вращающихся масс всего привода к ротору асинхронного электродвигателя I согласно общепринятой методике на основе закона сохранения кинетической энергии за исключением приведенного момента инерции потерь в зубчатой передаче:

$$J_{\text{пр}0}(\omega) \frac{\omega^2}{2} = [J_{\text{аэд}}(\omega) + J_{\text{пмэ}} + J_{\text{вш}}(\omega)] \frac{\omega^2}{2} + [J_{\text{тв}}(\omega) + J_{\text{пмр}}] \frac{\omega^2}{2i^2}; \quad (11)$$

$$J_{\text{пр}0}(\omega) = J_{\text{аэд}}(\omega) + J_{\text{пмэ}} + J_{\text{вш}}(\omega) + \frac{J_{\text{тв}}(\omega)}{i^2} + \frac{J_{\text{пмр}}}{i^2}, \quad (12)$$

где i – передаточное отношение зубчатой передачи.

Далее асинхронный электродвигатель I запускается и определяется динамика угловых ускорений $\varepsilon_5(\omega)$ всего зубчатого редуктора с электроприводом в сборе, при этом динамика крутящего момента, развиваемого электродвигателем определится как:

$$M(\omega) = (J_{\text{пр}0}(\omega) + J_{\text{пзп}}(\omega))\varepsilon_5(\omega). \quad (13)$$

Приравнивая выражения (4) и (13) определяют динамику приведенного к оси вращения ротора асинхронного электродвигателя момента инерции потерь в зубчатом зацеплении:

$$J_{\text{пзп}}(\omega) = (J_{\text{аэд}}(\omega) + J_{\text{пмэ}})\varepsilon_1(\omega)/\varepsilon_5(\omega) - J_{\text{пр}0}(\omega). \quad (14)$$

Общий приведенный к оси вращения ротора асинхронного электродвигателя момент инерции вращающихся масс зубчатого редуктора с электроприводом в сборе:

$$J_{\text{пр}}(\omega) = J_{\text{аэд}}(\omega) + J_{\text{пмэ}} + J_{\text{вш}}(\omega) + J_{\text{пзп}}(\omega) + J_{\text{тв}}(\omega)/i^2 + J_{\text{пмр}}/i^2. \quad (15)$$

Запишем выражение (15) через элементарные составляющие:

$$J_{\text{пр}}(\omega) = J_{\text{раэд}} + J_{\text{ппуаэд}}(\omega) + J_{\text{пмэ}} + J_{\text{вш}} + J_{\text{попвш}}(\omega) + J_{\text{пзп}}(\omega) + J_{\text{тв}}/i^2 + J_{\text{поптв}}(\omega)/i^2 + J_{\text{пмр}}/i^2. \quad (16)$$

Мощность, развиваемая отдельными элементами зубчатого электропривода определится как:

$$N(\omega) = J_{\text{разд}} \varepsilon_5(\omega)\omega + J_{\text{ппуэд}}(\omega)\varepsilon_5(\omega)\omega + J_{\text{пмэ}} \varepsilon_5(\omega)\omega + J_{\text{вщ}} \varepsilon_5(\omega)\omega + J_{\text{поввш}}(\omega) + J_{\text{пзп}}(\omega) \varepsilon_5(\omega)\omega + \frac{J_{\text{тв}}}{i^2} \frac{\varepsilon_5(\omega)\omega}{i^2} + \frac{J_{\text{поптв}}(\omega)}{i^2} \frac{\varepsilon_5(\omega)\omega}{i^2} + \frac{J_{\text{пмр}}}{i^2} \frac{\varepsilon_5(\omega)\omega}{i^2}. \quad (17)$$

Зная динамику мощности активной электрической энергии, поступающей на вход электродвигателя, и зная $N(\omega)$ становится возможным определение мощности потерь на вихревые токи и гистерезис в асинхронном электродвигателе.

ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Белогусев В.Н., Егоров А.В.
ГОУ ВПО «МарГТУ», Йошкар-Ола, Россия

Материал посвящен динамическому определению механических характеристик вращающихся частей трехфазных асинхронных электрических двигателей инерционным методом. В настоящее время для определения таких механических характеристик как момент инерции вращающихся частей, механический момент на валу, механическая мощность на валу существует несколько основных методов: статический метод; метод суммарного момента; квазистатический метод; динамический метод; косвенный метод.

Из выше перечисленных методов наиболее простым, быстрым и эффективным является динамический метод определения вращающего момента на валу двигателя, но в процессе его практической реализации необходимо с достаточной точностью знать момент инерции вращающихся масс двигателя, чего современные измерительные методы и средства с высокой точностью сделать не могут в отличие от определения угловых ускорений ротора двигателя.

Существующие способы определения момента инерции вращающихся частей электрической машины, регламентируются ГОСТ 11828–86: способ крутильных колебаний; способ вспомогательного маятника; способ самоторможения. К недостаткам этих методов следует отнести ограниченность применения по мощности, невозможность выделить механические потери и, как следствие, не высокая точность.

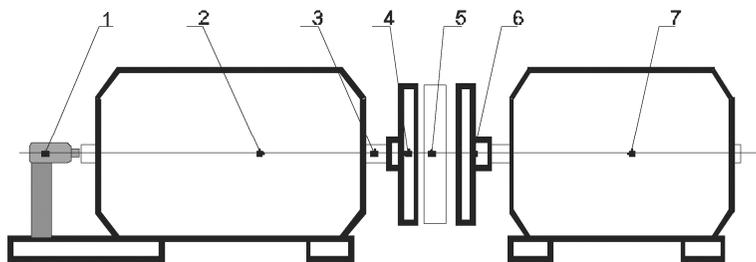


Рис. 1. Схема крепления эталонного диска, энкодера, однофазного двигателя к испытуемому трехфазному двигателю:

- 1 – энкодер; 2 – однофазный электрический двигатель; 3 – вал двигателя;
 4 – первая полумуфта; 5 – диск с эталонным моментом инерции;
 6 – вторая полумуфта; 7 – трехфазный электрический двигатель

Избавиться от выше перечисленных недостатков позволяет инерционный метод определения момента инерции вращающихся частей трехфазного электрического двигателя. Предлагаемый метод поясняет рис. 1:

Метод реализуется следующей последовательностью действий.

Первый этап: Из муфты вынимаются скрепляющие устройства, и удаляется элемент 5 с эталонным моментом инерции. Двигатель 2 запускается на холостом ходу, и угловая скорость выходного вала 3 доводится до величины $\omega_{\text{ном}}$, при этом определяется зависимость углового ускорения выходного вала от угловой скорости во всем диапазоне скоростных режимов:

$$\varepsilon_1(\omega) = \frac{\omega + d\omega - \omega}{dt}. \quad (1)$$

Определение зависимости углового ускорения выходного вала от угловой скорости происходит с помощью энкодера 1. В режиме холостого хода уравнение движения имеет следующий вид:

$$M(\omega) = j(\omega) \cdot \varepsilon_1(\omega), \quad (2)$$

где $j(\omega)$ – зависимость момента инерции ротора однофазного электрического двигателя с учетом потерь на трение в подшипниковых узлах от угловой скорости, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; $\varepsilon_1(\omega)$ – зависимость ускорения ротора от угловой скорости, с^{-2} ; $M(\omega)$ – зависимость вращающего момента двигателя от угловой скорости, $\text{Н}\cdot\text{м}$.

Второй этап. На полумуфту 4 вала электрического двигателя с помощью скрепляющих элементов закрепляется элемент муфты, обладающий эталонным моментом инерции j_3 . Двигатель запускается на холостом ходу, и угловая скорость системы «вращающиеся части однофазного двигателя и эталонный элемент» доводится до величины $\omega_{\text{ном}}$, определяется зависимость углового ускорения системы от угловой скорости ω :

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{\omega + d\omega - \omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (3)$$

В режиме холостого хода уравнение движения имеет следующий вид:

$$M(\omega) = (j(\omega) + j_3) \cdot \varepsilon_2(\omega). \quad (4)$$

Так как в режиме холостого хода вращающий момент двигателя всегда равен одной и той же величине, можем приравнять правые части выражения (2) и (4) и определить момент инерции вращающихся частей электрического двигателя:

$$j(\omega) = j_3 \cdot \frac{\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)}. \quad (5)$$

Затем полумуфту 4 и 6 скрепляются, соединяя однофазный двигатель с трехфазным 7, который не подключен к сети. Двигатель 2 запускается на холостом ходу, и угловая скорость системы «вращающиеся части однофазного двигателя и вращающиеся части трехфазного двигателя» доводится до величины $\omega_{\text{ном}}$, определяется зависимость углового ускорения системы от угловой скорости ω :

$$\varepsilon_3(\omega) = \frac{\omega + d\omega - \omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (6)$$

В режиме холостого хода уравнение движения имеет следующий вид:

$$M(\omega) = (j(\omega) + j_{3\phi}(\omega)) \cdot \varepsilon_3(\omega). \quad (7)$$

Так как в режиме холостого хода вращающий момент двигателя всегда равен одной и той же величине, можем приравнять правые части выражений (2) и (7) и определить момент инерции вращающихся частей трехфазного электрического двигателя:

$$j_{3\phi}(\omega) = j(\omega) \cdot \frac{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_3(\omega)}{\varepsilon_3(\omega)}. \quad (8)$$

Параметры питающей трехфазной сети постоянно меняются, поэтому в трехфазных двигателях трудно добиться идентичности запусков и возникновения необходимости определять момент инерции трехфазного асинхронного двигателя через однофазный двигатель.

На данный способ определения момента инерции электрического двигателя подана заявка на изобретение № 2008127116 «Способ определения момента инерции электрического двигателя».

Для реализации данного способа был создан аппаратно-программный комплекс. Он позволяет получить все основные эффективные характеристики электрического двигателя: момент инерции, крутящий момент, мощность, КПД этого двигателя автоматически, что позволит значительно повысить экономическую эффективность испытаний электрических двигателей.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Белогусев В.Н., Егоров А.В.
ГОУ ВПО «МарГТУ», Йошкар-Ола, Россия

Статья посвящена динамическому определению момента инерции вращающихся частей однофазного электрических двигателей инерционным методом, с помощью аппаратно-программного комплекса. В настоящее время для определения момента инерции вращающихся частей регламентируются ГОСТ 11828–86:

- способ крутильных колебаний (Недостатки: Необходимость разбора двигателя, ограниченность по мощности двигателя до 100 кВт);
- способ вспомогательного маятника (Недостатки: ограниченность по мощности двигателя от 10 до 1000 кВт, малая точность);
- способ самоторможения (Недостатки: ограниченность по мощности двигателя от 100 кВт, малая точность).

Избавиться от выше перечисленных недостатков позволяет инерционный метод определения момента инерции вращающихся частей однофазного электрического двигателя. Предлагаемый метод поясняет рис. 1:

Метод реализуется следующей последовательностью действий.

Первый этап: Из муфты вынимаются скрепляющие устройства, и удаляется элемент 5 с эталонным моментом инерции. Двигатель 2 запускается на холостом ходу, и угловая скорость выходного вала 3 доводится до величины $\omega_{ном}$, при этом определяется зависимость углового ускорения выходного вала от угловой скорости во всем диапазоне скоростных режимов:

$$\varepsilon_1(\omega) = \frac{\omega + d\omega - \omega}{dt}. \quad (1)$$

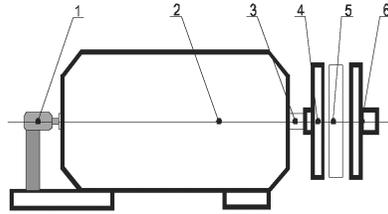


Рис. 1. Схема крепления эталонного диска и энкодера к испытуемому двигателю:

- 1 – энкодер; 2 – электрический двигатель; 3 – вал двигателя;
 4 – первая полумуфта, 5 – диск с эталонным моментом инерции;
 6 – вторая полумуфта

Определение зависимости углового ускорения выходного вала от угловой скорости происходит с помощью энкодера 1. В режиме холостого хода уравнение движения имеет следующий вид:

$$M(\omega) = j(\omega) \cdot \varepsilon_1(\omega), \quad (2)$$

где $j(\omega)$ – зависимость момента инерции ротора электрического двигателя с учетом потерь на трение в подшипниковых узлах от угловой скорости, кг·м²; $\varepsilon_1(\omega)$ – зависимость ускорения ротора от угловой скорости, с⁻²; $M(\omega)$ – зависимость вращающего момента двигателя от угловой скорости, Н·м.

Второй этап: На полумуфту 4 вала электрического двигателя с помощью скрепляющих элементов закрепляется элемент муфты, обладающий эталонным моментом инерции j_3 . Двигатель запускается на холостом ходу, и угловая скорость системы «выходной вал и эталонный элемент» доводится до величины $\omega_{\text{ном}}$, определяется зависимость углового ускорения системы «выходной вал и эталонный элемент» от угловой скорости ω :

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{\omega + d\omega - \omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (3)$$

В режиме холостого хода уравнение движения имеет следующий вид:

$$M(\omega) = (j(\omega) + j_3) \cdot \varepsilon_2(\omega). \quad (4)$$

Так как в режиме холостого хода вращающий момент двигателя всегда равен одной и той же величине, можем приравнять правые части выражения (2) и (4) и определить момент инерции вращающихся частей электрического двигателя:

$$j(\omega) = j_3 \cdot \frac{\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_2(\omega)}. \quad (5)$$

На данный способ определения момента инерции электрического двигателя подана заявка на изобретение № 2008127116 «Способ определения момента инерции электрического двигателя». Для реализации данного способа был создан аппаратно-программный комплекс.

Для сравнения результатов измерения момента инерции электрического двигателя по ГОСТ 11828–86 и предлагаемым методом был выбран электрический двигатель ТЭ-200/450 паспортной мощностью 450 Вт. По ГОСТ 11828–86 определение момента инерции вращающихся частей машины, мощность 450 Вт, возможно только методом крутильных колебаний.

Метод крутильных колебаний заключается в следующем, вращающуюся часть электрического двигателя следует подвергнуть крутильным колебаниям и определить их период T . Таким же образом и на той же струне следует определить период крутильных колебаний T_3 эталона, момент инерции которого определяется расчетным путем. Момент инерции исследуемой вращающейся части j , кг·м², определяется:

$$j = j_3 \left(\frac{T}{T_3} \right)^2, \quad (6)$$

где T – период колебаний исследуемой вращающейся части, с; T_3 – период колебаний эталона, с.

Для проверки точности метода испытания будем проводить на двух эталонных дисках с условно малым и большим моментом инерции равным соответственно $j_{м.д} = 0,006781$ кг·м² и $j_{б.д} = 0,022335$ кг·м² соответственно. Методом крутильных колебаний были получены следующие результаты период крутильных колебаний вращающихся масс электрического двигателя составил 5,95 с, малого эталонного диска 7,01 с, большого эталонного диска 12,1 с.

Проверим точность метода крутильных колебаний, вычислим момент инерции малого диска относительно большого и наоборот. По результатам получим момент инерции малого диска $j_{м.д} = 0,007496$ кг·м² и момент инерции большого $j_{б.д} = 0,020203$ кг·м². Сравним результаты с истинными значениями эталонных дисков получаем расхождение в диапазоне $\pm 10\%$.

Этот же двигатель ТЭ-200/450 предлагаемым инерционным способом показал результаты (при проведении 10 испытаний): с малым эталонным диском момент инерции вращающихся частей электрического двигателя $j = 0,0045 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, при большом эталонном диске момент инерции вращающихся частей электрического двигателя $j = 0,00475 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Как видно, результаты измерения момента инерции предлагаемым инерционным способом имеют расхождение с результатами метода крутильных колебаний в пределах $\pm 10 \%$, что говорит о возможности применения разработанного способа для предварительной оценки величины момента инерции, а также для выявления зависимости потерь на трение в опорах от угловой скорости. Применение разработанного аппаратно-программного комплекса способно значительно снизить трудоемкость процедуры определения момента инерции вращающихся масс за счет отсутствия необходимости разбора и демонтажа двигателя с рабочего места, быстроты и простоты проведения испытаний.

Секция № 15. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НК, ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС

Руководители секции: Прокофьев А.Б., Кудрявцев И.А.,
Матвеев В.И., Данилин Н.С.

ИНСПЕКЦИЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ РИСКА

Власов И.Э., Панчиков В.Н., Каковкин Д.А.
*ОАО «Оргэнергонефть»
Самара, Россия*

В настоящее время система промышленной безопасности в России основана на соблюдении многочисленных требований, предъявляемых со стороны государства и изложенных в законодательных и других нормативных документах обязательного характера. Существующая нормативная база охватывает все стадии жизненного цикла опасных производственных объектов (ОПО), технические и организационно-исполнительские аспекты управления ими, подсистемы управления промышленной безопасностью, требования к оборудованию, методикам и приборам его контроля, критериям пригодности и нормам отбраковки.

Отсутствие гибкости, консервативность существующей системы лишает эксплуатирующие организации свободы маневра, необходимого для эффективного управления в условиях значительного физического износа основных фондов и нехватки финансовых ресурсов для их быстрого обновления.

Этого недостатка лишена система управления, основанная на оценке риска эксплуатации ОПО. Система предусматривает разработку программ по обеспечению надежности оборудования с учетом уровня риска его эксплуатации, то есть технического состояния, надежности и степени опасности. Это позволяет существенно экономить эксплуатационные затраты организаций за счет концентрации усилий и средств на наиболее проблемных объектах по принципу «максимальное снижение риска при минимальных затратах», поэтапно, год за годом, уверенно снижать интегральные показатели риска в целом по предприятию. В условиях значительной изношенности производственных фондов и нехватки финансовых ресурсов для их обновления такая система управления представляется безальтернативной.

Базовым элементом системы является Методика инспекции оборудования с учетом факторов риска (ИУФР, зарубежное наименование – RBI), которая обеспечивает своевременное получение достоверной информации о состоянии оборудования для принятия управленческих решений с минимальными затратами.

Для конкретных комплексов технологического оборудования методика предусматривает:

- Идентификацию вероятных видов деградации оборудования;
- Группирование элементов технологических схем по принципу общности механизмов деградации и возможности реализации единой стратегии контроля и поддержания надежности;
- Анализ рисков с определением показателя критичности (категорийности по степени опасности) выделенных групп оборудования;
- Разработку программ контроля по каждой группе оборудования с определением контрольных точек, параметров и критериев контроля, требований к приборам, методикам контроля и инспекционному персоналу;
- Процедуры оценки остаточного ресурса оборудования для различных механизмов деградации;
- Процедуры оценки степени опасности дефектов и срока безопасной эксплуатации дефектного оборудования;
- Процедуры расчета межинспекционного интервала (периода до проведения следующей инспекции) с учетом критичности оборудования.
- Процедуры планирования инспекций в целом по предприятию с учетом результатов ИУФР.

В докладе изложены основные методические положения и порядок выполнения ИУФР, способы обработки результатов инспекций и принятия управленческих решений. Приведены примеры успешного применения методики.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Юхацкова О.В.¹, Муханов Е.Е.¹, Сясько В.А.², Чертов Д.Н.²

¹*ОАО «ЦНИИ Специального машиностроения»
Хотьково, Московской обл., Россия*

²*ЗАО «Константа», Санкт-Петербург, Россия*

В настоящем докладе приведен первый этап исследований – исследование и разработка макетных вихретоковых преобразователей.

Исследования проводились на образцах рис. 1–2.

Представляет интерес использование вихретокового вида неразрушающего контроля для выявления мест поверхностных дефектов типа «трещина» на изделиях из углерод – углеродных материалов.

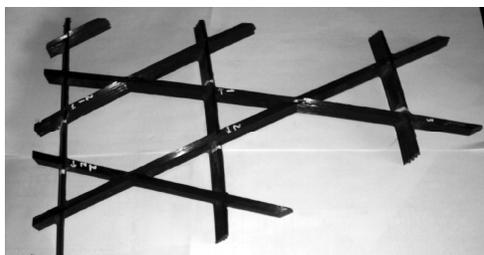


Рис. 1. Образец сетчатой структуры с искусственными дефектами

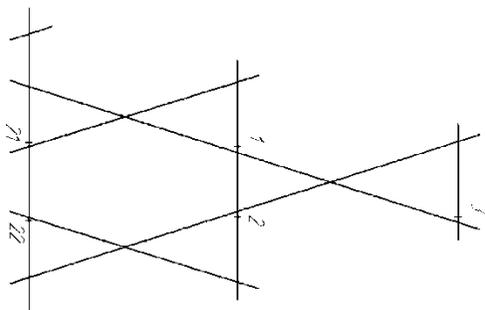


Рис. 2. Эскиз образца сетчатой структуры с обозначением мест расположения искусственных дефектов

Возможность выявления дефектов вихретоковыми методами поясняет-ся рис. 3, на котором представлено электропроводящее неферромагнитное изделие толщиной δ и электропроводностью σ . Вихревые токи, индуцированные в объекте контроля, распространяются в изделии. Вихревые токи $J_{вт}$ в каждом слое изделия оказывают свое, отличное друг от друга влияние на результирующее магнитное поле системы преобразователь – объект контроля.

Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности объекта контроля в объеме распространения вихревых токов, изменяющемся в зависимости электропроводности изделия и его слоев, а также от наличия (отсутствия) дефектов (поверхностных трещин). При увеличении глубины трещины T от нуля до значения $T_{\text{макс}}$, интегральная электропроводность объекта контроля будет уменьшаться от значения, соответствующего качеству, до значения, соответствующего дефекту.

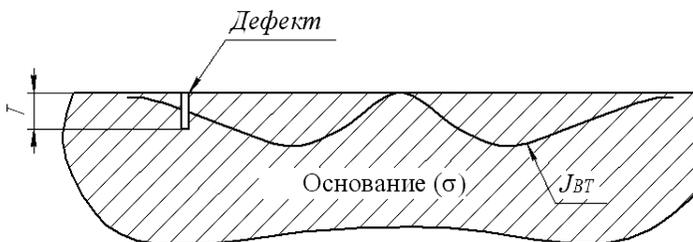


Рис. 3. Распространение вихревых токов в электропроводящем неферромагнитном изделии

Измерения материала сетчатой структуры показали, что образцы обладают ярко выраженной анизотропией свойств. Вдоль волокон электропроводность составляет порядка 115 кСм/м, поперек – 0,5 кСм/м.

Структурные схемы преобразователей, поясняющие принцип их действия, представлены на рис. 4 и 5.

Рассмотрим работу вихретокового частотного преобразователя на основе автогенераторной схемы (рис. 4).

Вихретоковый частотный метод основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля обмотки W первичного преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте.

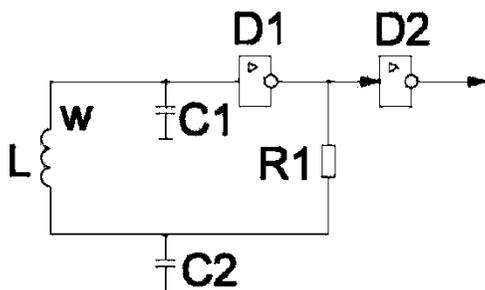


Рис. 4. Структурная схема вихретокового частотного измерительного преобразователя (Автогенераторный вихретоковый частотный преобразователь):

W – обмотка преобразователя;
 $C1, C2$ – конденсаторы, $R1$ – резистор обратной связи; $D1, D2$ – инверторы

Обмотка W , возбуждаемая переменным током $i(t)$, создает переменный магнитный поток $\Phi(t)$, индуцирующий в электропроводящем объекте вихревые токи $J_{вТ}(t)$. Магнитный поток $\Phi_{вТ}(T, t)$, возбужденный вихревыми токами, противодействует магнитному потоку $\Phi(t)$.

Индуктивность катушки $L_{вТ}$ с учетом влияния поля вихревого тока будет зависеть от интегральной электропровод-

ности изделия:

$$L_{\text{вт}}(T) = (\Phi - \Phi_{\text{вт}}(T))/I,$$

где Φ и $\Phi_{\text{вт}}(T)$ – действующие значения магнитных потоков, а I – действующее значение тока.

Обозначим как L_{∞} собственную индуктивность обмотки W , не взаимодействующей с электропроводящим объектом. Тогда отношение $l(T) = L_{\text{вт}}(T)/L_{\infty}$ будем называть относительной индуктивностью обмотки W . С уменьшением электропроводности объекта контроля (увеличением глубины дефекта T) $J_{\text{вт}}(t)$ будет уменьшаться. Таким образом, $l(T)$ обратно пропорциональна величине электропроводности и обратно пропорциональна глубине дефекта.

Частота колебаний f автогенератора зависит от индуктивности $L_{\text{вт}}(T)$, а следовательно, от электропроводности и T :

$$f(T) = 1/(2\pi\sqrt{(L_{\text{вт}}TC_3)}),$$

где $C_3 = C_1C_2/(C_1 + C_2)$ – эквивалентная емкость колебательного контура.

В общем случае глубина проникновения вихревых токов δ , определяющая максимальную глубину дефекта $T_{\text{макс}}$, равна:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; σ – электропроводность объекта контроля.

Для обеспечения приемлемой чувствительности преобразователя $T_{\text{макс}}$ следует выбрать из условия:

$$T_{\text{макс}} = (0,6 \dots 0,8)\delta.$$

Из двух последних соотношений определяется оптимальное значение частоты преобразователя $f_{\text{опт}}$. Аналогично определяется оптимальное значение эквивалентного радиуса R обмотки W .

Рассмотрим работу вихретокового фазового преобразователя (рис. 5).

Обмотка $W_{\text{в}}$ запитывается синусоидальным напряжением $u_1(t)$ частоты f . Усиленное разностное (вносимое) напряжение $\Delta u(t, T)$ поступает на фазовый детектор ФД. Опорным сигналом для фазового детектора служит напряжение $u_{\text{к}}(t)$ с выхода компенсационной обмотки $W_{\text{к}}$. Постоянное напряжение на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз между напряжением $u_{\text{к}}(t)$ и разностным (вносимым) напряжением $\Delta u(t, T)$. Балансировка обмоток преобразователя производится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

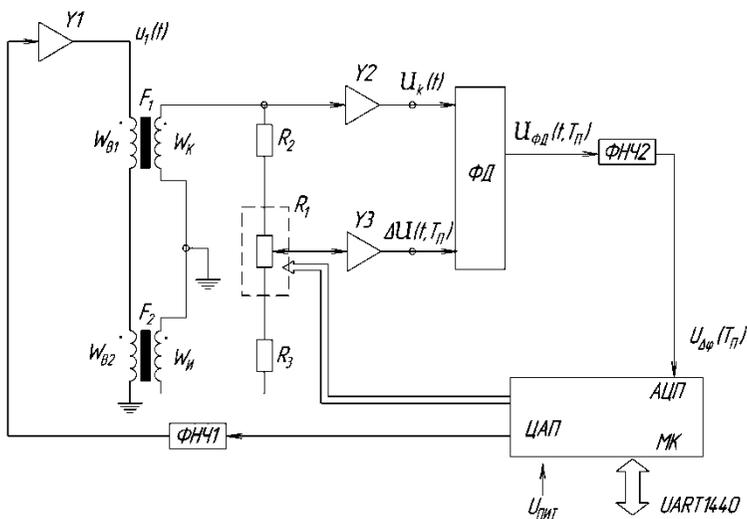


Рис. 5. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя:

У₁–У₃ – усилители; ФД – фазовый детектор;
 ФНЧ₁–ФНЧ₂ – фильтры низкой частоты; W_в – обмотка возбуждения;
 W_к и W_и – дифференциально включенные компенсационная и
 измерительная обмотки; МК – микроконтроллер; R₁ – управляемый цифровой
 балансировочный потенциометр

Для анализа параметров измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный параметр

$$\beta = R\sqrt{(2\pi f \sigma_{и} \mu_0)}$$

где R – эквивалентный радиус обмотки возбуждения; f – частота тока возбуждения; $\sigma_{и}$ – интегральная электропроводность материала; μ_0 – магнитная постоянная.

В общем случае глубина проникновения вихревых токов δ , определяющая максимальную глубину выявляемых дефектов T_{\max} равна:

$$\delta = 1/\sqrt{(\pi f \sigma_{и} \mu_0)}.$$

Проведенные исследования показали, что слои углеродных композиционных материалов могут отличаться по электропроводности, следова-

тельно глубина проникновения вихревых токов должна обеспечивать интегральную оценку их свойств при измерении.

Оптимальным для рассматриваемой задачи являются $T_{\max} \approx 0,7\delta$. Из указанных выше соотношений легко определяется оптимальное значение частоты преобразователя для обнаружения дефектов $f_{\text{опт}}$

НА ПУТИ ОТ ДЕФЕКТОСКОПИИ К ДЕФЕКТОМЕТРИИ

Панчиков В.Н., Власов И.Э., Иванов В.И.

ОАО «Оргэнергонефть», Самара, Россия

В докладе обсуждаются актуальные проблемы Неразрушающего Контроля (НК), который претерпевает коренную перестройку, связанную с переходом от качественных оценок к количественным показателям. Их можно получить только в процессе измерения.

Революционный переход в настоящее время связан с необходимостью повышения уровня Промышленной Безопасности (ПБ). Безопасность – является фундаментальным требованием. В проблемах безопасности важную роль играет техническое диагностирование (ТД), которое мы понимаем как: «определение технического состояния объекта с целью оценки безопасности и прогнозирования ресурса». В ТД включаем НК, Механику Разрушения (МР), Материаловедение и другие направления.

ТД и НК должны дать информацию для количественной оценки безопасности. Измерение безопасности можно проводить через определение уровня «риска», который определяется произведением вероятности аварии на потери в результате аварии.

Современный этап развития ТД и НК требует использование новых параметров, технических средств и подходов, включая применение таких показателей, как Вероятность Обнаружения Дефекта (ВОД-PoD), Операционные Характеристики Приемника (ХОП-ROC), Калибровочные Характеристики (КХ) и других параметров (рис. 1–3).

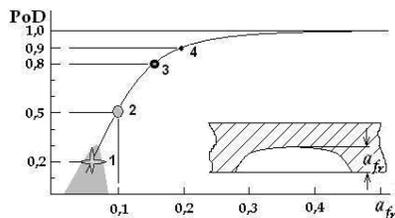


Рис. 1. Вероятность обнаружения дефекта

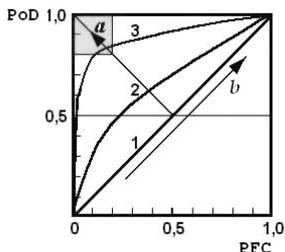


Рис. 2. Операционная характеристика приемника



Рис. 3. Обобщенная калибровочная характеристика

ВОД-диаграмма (рис. 1) связывает размер дефекта с вероятностью его обнаружения. В докладе использовано понятие критического размера дефекта и предложено использовать его значение в качестве меры выбора требований к чувствительности системы НК. Дальнейшее развитие этого подхода связано с отказом от нормирования дефектов и с переходом к расчету степени опасности дефекта для конструкции. Эту диаграмму можно использовать в качестве характеристики квалификации системы НК и фирмы, обладающей этой системой.

Операционная характеристика приемника (рис. 2) содержит рекомендацию относительно совместного выбора необходимых показателей НК по обнаружению дефектов и по «перебраковке», которая чревата существенными дополнительными затратами.

Калибровочная характеристика (рис. 3) должна стать одним из основных показателей системы НК, поскольку информация о размерах дефекта необходима для оценки опасности дефекта, которая возможна с использованием методик расчета в механике разрушения.

В случае, если параметры используемой системы НК не позволяет обеспечить требования извлечения необходимого количества информации предложено использовать дополнительные контроли. Приведены оценки улучшения показателей при повторных контролях.

Все эти характеристики необходимы для определения степени опасности дефекта для конструкции и более надежного прогнозирования остаточного ресурса.

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК РОТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ВНУТРЕННИМ И ПОВЕРХНОСНЫМ ДЕФЕКТАМ

Покасов Ю.И., Покасов И.М.

ТОО НПО ТЕХНИК, Караганда, Республика Казахстан

Доклад посвящен вопросам диагностирования критических точек роторов, якорей электродвигателей по внутренним дефектам, с учетом вибрации, в основном роторов. Диагностирование осуществляется с применением комплекса методов и средств неразрушающего контроля.

Разработанная нами технология технического диагностирования роторов предусматривает, предупреждение поломки роторов за счет диагностики состояния по внутренним дефектам. Работа проводилась в специализированных организациях: заводы НОММ, РГТО, ЭНЕРГОЗАВОД, шахта Костенко, шахта Казахстанская. ТОО НПО Техник, Центр неразрушающего контроля.

В процессе контроля выявляются:

- а) поковки, литье – внутренняя концентрация напряжения;
- б) динамическая, статическая нагрузка (твердые частицы);
- в) обороты ротора.

Для выполнения работ применялись дефектоскопы отечественного и зарубежного производства, научные достижения в ультразвуковом контроле (заморозка на экране дефектов), математическое моделирование.

Для проверки использовался УЗК, магнит, порошок:

- с доступных мест, с торца вала (широкополосная волна); комплексный подход (вибрация, УЗК);
- дефекты – поверхностные, внутренние, (литейные, поковочные);
- внутреннее, поверхностное остаточное напряжение; (магнитопорошковый и капиллярный методы);
- во всю длину вала (диаметр дефекта);
- твердые частицы (обороты, вибрация ротора);
- критические точки (карта, чертеж, диагностика.) рис. 1;
- определение остаточной прочности $\sigma_{\text{т-бв}}$ (математический расчет);
- твердость по Бринеллю.

Результатом выполнения контроля комплексным методом является выявление причины поломки вала (заказчик, исполнитель).

ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ НАКЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Шкатов П.Н., Черненко П.И.

НУЦ «КАСКАД» при МГУПИ, Москва, Россия

Электродный метод весьма эффективен для измерения глубины h выявленных поверхностных трещин. Разработанные ранее в МГУПИ алгоритмы решения соответствующей обратной задачи позволяют получить оценку h с учетом влияния толщины контролируемого участка T , длины трещины ℓ и межэлектродных расстояний R_T между токовыми электродами и R_{Π} между потенциальными. При этом суммарная погрешность измерения h для трещин, ортогональных к поверхности контролируемого участка, составляет около 10 % от измеряемой величины. Однако реальные трещины могут иметь ориентацию к поверхности отличную от ортогональной, что приводит к дополнительной погрешности. Данный вид дополнительной погрешности особенно значим для трещин типа закатов. Здесь угол α между плоскостью трещины и поверхностью контролируемого участка может существенно отличаться от 90° , достигая значений $15\dots 20^\circ$.

Для оценки величины α рассматривалось два варианта дополнительных измерений. В первом варианте проводилось два дополнительных измерения при размещении электродов на линии, параллельной следу трещины. При первом измерении электроды располагались с одной стороны от следа трещины, а при втором измерении – с другой. В обоих случаях расстояния от следа трещины до линии установки электродов должны быть равны.

Во втором варианте проводилось два дополнительных измерения при размещении электродов на линии, перпендикулярной следу трещины. При измерениях центр системы электродов смещался от следа трещины на одинаковую величину в разные стороны.

В обоих вариантах информацию об угле α получали по отношению измеренных при первом и втором измерениях напряжений.

Путем математического моделирования проводился анализ соответствующих зависимостей от параметров трещины h и ℓ , а также толщины T . Определялись условия для наилучшей оценки α за счет выбора различных вариантов установки электродов при дополнительных измерениях. Показано, что для получения достоверных результатов целесообразно проводить несколько измерений с размещением электродов на различных расстояниях (первый вариант) и/или с различными смещениями относительно следа трещины.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ОТБРАКОВКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Архипов А.И., Тюлевин С.В., Козлова И.Н., Костин А.В.
СГАУ им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам электрофизической диагностики полупроводниковых диодов по виду прямой ветви ВАХ. По результатам диагностики производится отбраковка потенциально ненадежных образцов. Предложено устройство, которое может быть использовано для контроля параметров полупроводниковых диодов при их производстве.

Недостатками известных устройств диагностики и отбраковки диодов являются низкие точность и достоверность отбраковки.

В данной работе была поставлена задача повысить точность и достоверность отбраковки.

На рис. 1 представлена блок-схема предлагаемого устройства.

Устройство содержит двухпороговый компаратор 1, первый источник опорного напряжения 2, генератор пилообразного напряжения 3, второй источник опорного напряжения 4, испытуемый диод 5, третий источник опорного напряжения 6, компаратор 7, дифференцирующее устройство 8 и преобразователь ток-напряжение 9.

В устройстве последовательно соединены преобразователь ток-напряжение 9, дифференцирующее устройство 8 и компаратор 7. Выход третьего источника опорного напряжения 6 связан с первым входом компаратора 7, выход которого подключен к управляющему входу генератора пилообразного напряжения 3. Выходы первого и второго источников опорного напряжения 2 и 4 связаны соответственно с первыми вторым пороговыми входами двухпорогового компаратора 1, выход которого образует выход устройства. Сигнальный вход двухпорогового компаратора 1 и выход генератора пилообразного напряжения 3 объединены и подключены к анодной клемме испытуемого диода 5, катодная клемма которого связана со входом преобразователя ток-напряжение 9.

Устройство работает следующим образом. Генератор пилообразного напряжения 3 (на основе последовательно соединенных генератора прямоугольных импульсов, элемента И и счетчика, а также ЦАП и компаратора) формирует пилообразный сигнал положительного знака, который поступает на сигнальный вход «С» двухпорогового компаратора 1 и анод испытуемого диода 5. Преобразователь ток-напряжение 9 (на основе инвертирующей схемы включения операционного усилителя) преобразует ток, протекающий через испытуемый диод 5, в пропорциональное ему напряжение.

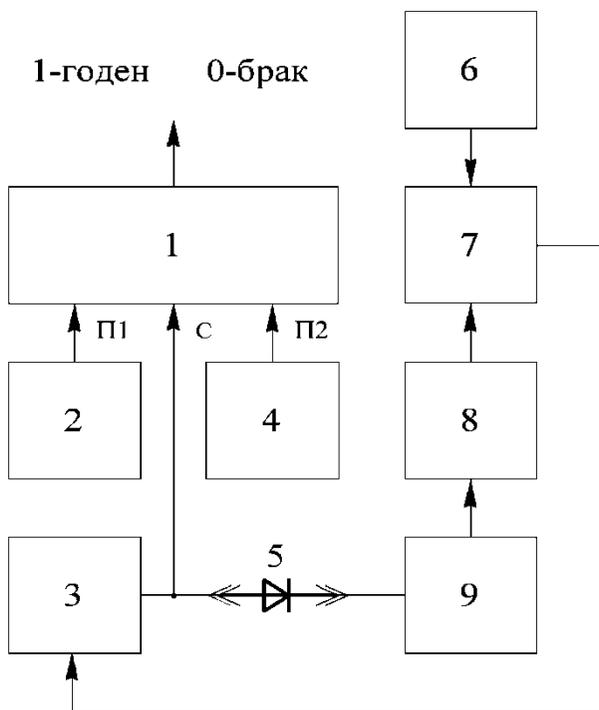


Рис. 1. Устройство для отбраковки диодов

При этом вход преобразователя ток-напряжение 9 представляет собой «виртуальную землю», поэтому потенциал катода испытуемого диода 5, связанного с ней, близок к нулю, а напряжение на диоде 5 совпадает с выходным напряжением генератора пилообразного напряжения 3.

На выходе дифференцирующего устройства 8 формируется напряжение, пропорциональное первой производной по времени выходного напряжения преобразователя ток-напряжение 9. Компаратор 7 сравнивает выходные напряжения дифференцирующего устройства 8 и третьего источника опорного напряжения 6. Последнее пропорционально численному значению аналогичной производной заведомо качественного диода, взятой для случая, когда прямое напряжение на нем равно контактной разности потенциалов. По превышению первым входным напряжением компаратора 7 уровня второго, на его выходе формируется логический «0». Он поступает на управляющий вход генератора пилообразного напряжения 3, останавливая дальнейший рост и осуществляя фиксацию его выходного напряжения.

В силу отличий одного диода от другого, зафиксированное выходное напряжение генератора пилообразного напряжения 3, совпадающее с контактной разностью потенциалов, будет иметь некоторый разброс. Нижняя граница области допустимых значений задается выходным напряжением первого источника опорного напряжения 2, верхняя – выходным напряжением второго источника опорного напряжения 4. Эти напряжения поступают соответственно на первый П1 и второй П2 пороговые входы двухпорогового компаратора 1.

Если зафиксированное выходное напряжение генератора пилообразного напряжения 3 лежит в заданном поле допуска, то на выходе двухпорогового компаратора 1 формируется логическая «1», в противном случае – логический «0». Наличие логической «1» на выходе двухпорогового компаратора 1 позволяет говорить об исправности испытуемого диода 5, а наличие логического «0» – о его дефектном состоянии.

Преимуществами устройства по сравнению с прототипом являются повышенные точность и достоверность, которые достигаются путем проведения отбраковки диодов, используя прямую ветвь ВАХ. В этом случае (по сравнению с обратной ветвью ВАХ) через диод течет больший ток, связанный с основными носителями заряда, который легче измерить и при этом обеспечить лучшее соотношение сигнал/шум.

Кроме того, устройство позволяет проводить динамическую отбраковку диодов, задавая различные скорости изменения выходного напряжения генератора пилообразного напряжения 3.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА МИКРОСХЕМ СЕРИИ 765

Архипов А.В., Пиганов М.Н., Тюлевин С.В., Архипов А.И.

СГАУ им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен электрофизической диагностике микросхем со структурой КМОП-типа. В процессе диагностики контролируется критическое питающее напряжение. Предложены методика и устройство контроля микросхем серии 765.

Необходимость входного контроля радиокомпонентов и тем более ИМС – очевидна. Однако, в ряде случаев, параметрический контроль недостаточен. Это особенно справедливо если от надежного функционирования элементов зависит работоспособность аппаратуры военного или аэрокосмического назначения. Поэтому разрабатываются методики динамического неразрушающего контроля (ДНК).

Для диагностирования микросхем 765 серии нами использована методика, основанная на измерении критического питающего напряжения (КПН). Под КПН понимают минимальное напряжение питания ИМС, при котором микросхема еще нормально (без сбоев) функционирует.

Известно, что значительная часть постепенных отказов МОП и КМОП ИМС обусловлена дефектами окисла и деградационными процессами на границах раздела полупроводника с окислом и окисла с металлом. Эти процессы приводят к дрейфу порогового напряжения транзисторов и росту токов утечек и потребления, что, в конечном счете, приводит к параметрическому отказу.

Связь КПН с пороговым напряжением очевидна: при уменьшении напряжения питания отказ схемы наступит, когда его величина станет ниже максимального из пороговых напряжений, имеющих в микросхеме МОП – транзисторов.

Поэтому аномальным интегральным схемам должен соответствовать максимальный уровень КПН.

Кроме того исследованиями доказана связь частотной зависимости КПН с такими параметрами как токи утечек и плотность поверхностных состояний на границе Si-SiO₂.

Следовательно, критическое питающее напряжение – высокоинформативный интегральный параметр качества МОП ИМС.

Суть методики заключается в том, что на испытуемую микросхему подают тестовую последовательность импульсов и изменяемое напряжение питания.

При постепенном снижении напряжения питания наступает момент, когда выходная последовательность импульсов, преобразуемая сигнатурным анализатором не будет совпадать с предыдущей. Данный эффект позволит с высокой точностью, определяемой фактически шагом изменения напряжения питания, зафиксировать момент сбоя работы микросхемы.

Структурная схема устройства, реализующего данную методику, представлена на рис. 1.

ГТП формирует тестовые сигналы, поступающие на входы контролируемой ЦИМС, а также служебные сигналы, необходимые для работы сигнатурного анализатора: «СТАРТ», «СТОП» и синхроимпульсы. Импульсы «СТОП» подаются также на СЦ.

Сигнатурный анализатор преобразует схемой сжатия длинные двоичные последовательности, поступающие от контролируемой ИМС, в короткие четырехзначные шестнадцатеричные ключевые коды – сигнатуры. Вероятность получения одинаковой сигнатуры для двух различных двоичных последовательностей исключительно мала ($< 2^{-16} = 0,000015$).

Устройство измерения КПН работает следующим образом: в очередном цикле тестирования полученная сигнатура сравнивается с предыдущей, записанной в запоминающем устройстве (ЗУ) сигнатурного анализа-

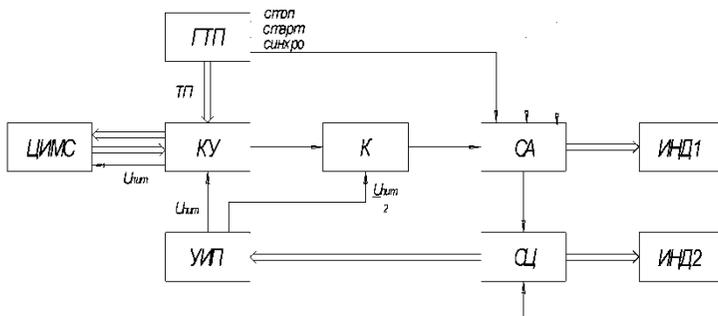


Рис. 1. Структурная схема для измерения КПН

тора. При их совпадении ЦИМС считается работоспособной. Выходное напряжение УИП под воздействием СЦ уменьшается на 0,1 В и тестирование продолжается при новом значении напряжения питания ЦИМС.

Она состоит из следующих элементов:

- ЦИМС – цифровая интегральная микросхема;
- КУ – коммутирующее устройство;
- ГТП – генератор тестовых последовательностей;
- К – компаратор;
- СА – сигнатурный анализатор;
- СЦ – счетчик циклов;
- УИП – управляемый источник питания;
- ИНД 1, ИНД 2 – индикаторы.

Если же СА зафиксирует сбой в работе ЦИМС (т.е. очередная сигнатура не совпадает с предыдущей – эталонной), то на СА зажжется индикатор нестабильной сигнатуры и соответствующий сигнал запретит поступление импульса «СТАРТ» и «СТОП», синхроимпульсов от ГТП на СА, а также поступление «СТОП» на СЦ. Измерение при этом заканчивается и на индикаторе, подключенном к СЦ, высвечивается значение КПН.

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДИОДОВ

Хасиятуллов М.Г., Тюлевин С.В., Архипов А.И., Шопин Г.П.

СГАУ им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен диагностическому неразрушающему контролю (ДНК) полупроводниковых диодов типа 2Д918Б1. При этом контролируются обратный ток и длительность импульса. По результатам контроля производится отбраковка потенциально ненадежных образцов.

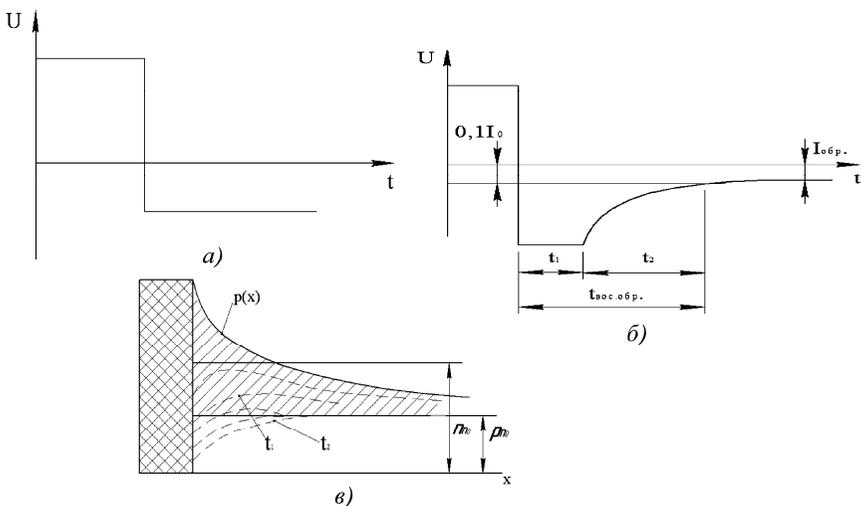


Рис. 1

В основу методики положено учение о переходных процессах в «р-п» переходе, смещенном в обратном направлении.

Пусть через р-п переход протекает прямой ток, обусловленный инжекцией дырок в базовую область. В базе накоплен заряд, созданный неосновными носителями, пропорциональный этому току, и заряд основных носителей, обеспечивающий электронейтральность полупроводника. При быстром изменении полярности приложенного напряжения инжектированные дырки не успевают рекомбинировать и под действием обратного напряжения переходят назад, в область эмиттера. Основные носители заряда движутся в противоположную сторону и уходят по шине питания. При этом обратный ток сильно увеличивается. Постепенно дополнительный заряд дырок в базе исчезает (рассасывается) за счет рекомбинации их с электронами и возвращения в р-область. Обратный ток уменьшается до статического значения.

Переход «р-п» ведет себя подобно емкости, причем заряд диффузионной емкости пропорционален прямому току, протекавшему ранее через «р-п»-переход.

Важным параметром в этом процессе для нас является $t_{вос.обр.}$ – время восстановления обратного сопротивления диода. Это – интервал времени, прошедший с момента прохождения тока через нуль (после изменения полярности приложенного напряжения) до момента, когда обратный ток достигнет заданного малого значения.

Наличие времени восстановления обусловлено зарядом, накопленным в базе диода при инжекции. Для запираания диода этот заряд должен быть «ликвидирован». Это происходит за счет рекомбинации и обратного перехода неосновных носителей заряда в эмиттер. Последнее приводит к увеличению обратного тока. После изменения полярности напряжения в течение некоторого времени t обратный ток меняется мало (рис. 1, а, б) и ограничен только внешним сопротивлением цепи.

При этом заряд неосновных носителей, накопленных при инжекции в базе диода (концентрация $p(x)$), рассасывается (пунктирные линии на рис. 1, в). По истечении времени t_1 концентрация неосновных носителей заряда на границе перехода равна равновесной, но в глубине базы ещё имеется неравновесный заряд. С этого момента обратный ток диода уменьшается до своего статического значения. Изменение его прекратится в момент полного рассасывания заряда, накопленного в базе.

Вышеизложенный материал можно применить в следующем контексте. При подаче на диод прямоугольного импульса на выходе мы получим сигнал, форма которого будет выглядеть как на рис. 1, б. Чтобы получить на выходе прямоугольный импульс, на вход надо подать сигнал, форма которого будет соответствовать показанному на рис. 2.

Использование прямоугольного импульса на выходе диода обусловлено тем, что сигнал такого вида легче обрабатывать и снимать с него нужную информацию.

Для разработки устройства ДНК нам необходимо знать два параметра: 1) обратный ток; 2) длительность импульса.

При помощи преобразователя ток-напряжение мы увидим некоторый разброс параметров, по которым мы можем узнать, годен или не годен диод по допускам на обратный ток.

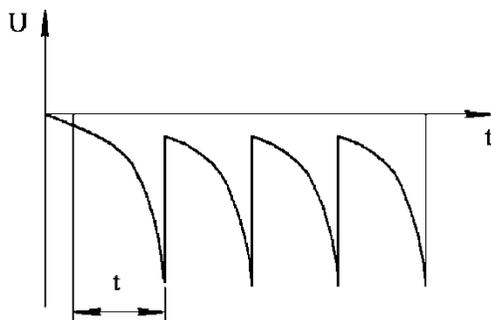


Рис. 2

Второй же параметр – длительность импульса, несет информацию о концентрации носителей в полупроводнике, т.е. о степени его дефектности. Таким образом, длительность импульса можно использовать в качестве информативного параметра для отбраковки потенциально ненадежных диодов. Этот принцип положен в основу методики ДНК диодов 2Д918Б1.

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ОТБРАКОВКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Козлова И.Н., Тюлевин С.В., Наседкин А.В.
СГАУ им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам диагностического контроля полупроводниковых диодов. Методика контроля предусматривает измерение m -параметра вольт-амперной характеристики и уровня низкочастотного шума. По результатам контроля производится отбраковка потенциально ненадежных диодов.

Предлагается двухэтапная проверка и отбраковка полупроводниковых диодов по m -параметру и уровню низкочастотного шума ($U_{ш\text{ отбр.}}$). Результаты испытаний показали, что по m -параметру отбраковывается в среднем около 5 % полупроводниковых диодов. Для получения более полной информации о качестве испытываемой партии элементов рекомендуется для приборов, прошедших по m -параметру провести измерение уровня низкочастотного шума при обратном напряжении смещения.

Величина коэффициента m зависит от совершенства структуры p - n перехода, базовой области и омических контактов. По степени отклонения значения коэффициента m от теоретического для различных диапазонов можно судить о качестве прибора. Этот принцип был положен нами в основу методики диагностического контроля диодов.

Согласно этой методике контроль производится посредством регистрации тока через диод в 17 дискретных точках следующих поддиапазонов:

I (маленькие токи) $10^{-10}/10^{-7}$ А,

II (средние токи) $3 \cdot 10^{-7}/10^{-4}$ А,

III (большие токи) $3 \cdot 10^{-4}/10^{-2}$ А.

По результатам измерений строились m -характеристики и сравнивались с идеализированной характеристикой, согласно которой у совершенной полупроводниковой кремниевой структуры в поддиапазоне I коэффициент m изменяется в пределах от 2 до 1, в поддиапазоне II практически неизменен и равен 1, а в диапазоне III изменяется от 1 до 2.

Характеристики реальных диодов имеют разброс. По отклонению m -характеристики партии диодов от идеализированной можно оценить стабильность технологического процесса и, на основе полученных данных, судить о возможных дефектах в полупроводниковых структурах.

Экспериментально исследовались диоды марок 2Д503А.

При измерении m -параметров использовалось следующее оборудование:

1. Установка диагностического контроля полупроводниковых диодов по m -характеристике.

2. Цифровой вольтметр В7-38.

3. Осциллограф С1-118.

4. Блок питания Б5-49.

Определение m -параметра производилось косвенным методом путем измерения напряжения $U_{\text{вых}}$ прибора. Данное устройство обеспечивало измерение $U_{\text{вых}}$ с точностью $\pm 5\%$. Осциллограф и вольтметр использовались для наблюдения функциональной зависимости $U_{\text{вых}} = f(m)$. На экране осциллографа наблюдалась форма m -характеристики, а с помощью цифрового вольтметра измерялось непосредственное значение m -параметра. Так как вольтметром измерялось пиковое значение напряжения, то значения m -параметра вычислялось по формуле:

$$m = [9,96 + U_{\text{вых}}]/11,$$

где $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение, измеряемое вольтметром.

Диод считался «негодным», если значение m -параметра не укладывалось в интервал [1, 2].

Результаты измерений и их математической обработки для диодов типа 2Д503А приведены в табл. 1.

Исследование диодов, прошедших отбраковку по m -параметру показало, что часть из них оказались забракованными. У этих образцов наблюдалось повышенное значение напряжения низкочастотного шума.

Низкочастотные шумы представляют наибольший интерес с точки зрения прогнозирования отказов диодов, так как причиной их возникновения являются различного рода дефекты в структуре полупроводниковых приборов. В литературе еще нет единой терминологии для этого вида шума. Мы в дальнейшем будем этот шум называть низкочастотным, подразумевая под ним шум, спектральная плотность мощности которого пропорциональна $1/f^\gamma$, где коэффициент γ характеризует вид спектра.

Экспериментально напряжение низкочастотного шума полупроводниковых диодов типа 2Д503А исследовалось на установке «Старт-1». Измерения шумов проводились в полосе частот от 6 Гц до 6 кГц.

**1. Значения m -параметра для диодов 2Д503А
при температуре 25 °С**

Номер образца	Значение m -параметра	Номер образца	Значение m -параметра
1	1,346	26	1,754
2	1,348	27	1,639
3	1,345	28	1,251
4	1,286	29	1,322
5	1,314	30	1,273
6	1,652	31	2,185
7	1,305	32	1,229
8	1,276	33	1,266
9	1,288	34	1,318
10	1,742	35	1,515
11	1,404	36	1,222
12	1,461	37	1,248
13	1,453	38	2,207
14	1,248	39	1,316
15	1,265	40	1,321
16	2,106	41	1,364
17	1,293	42	1,372
18	1,254	43	1,418
19	1,309	44	1,419
20	1,508	45	1,506
21	1,502	46	1,272
22	1,414	47	1,293
23	1,355	48	1,264
24	1,282	49	1,303
25	1,314	50	1,408

Измерение значений напряжения шума $U_{ш}$ производится при различных значениях обратного напряжения, выбираемых согласно ТУ. Уровень отбраковки $U_{ш.о.}$ определяется путем вероятностно-статистической обработки результатов измерения зависимости $U_{ш} = f(U_{обр})$.

СКВОЗНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗИРУЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ФОТОДИОДОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Тюлевин С.В., Шумских И.Ю., Пиганов М.Н., Токарева А.В.

СГАУ им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам электрофизической диагностики фотодиодов для космической аппаратуры. По результатам диагностического контроля производится прогнозирование будущего состояния фотодиодов и отбраковка потенциально ненадежных образцов. Разработаны рекомендации для изготовителей элементов, узлов и приборов.

В процессе изготовления и эксплуатации изделий выявилась нестабильность работы бортовых приборов из-за самоустраняющихся отказов (дефектов) электрорадиоизделий (ЭРИ). В процессе исследований установлено, что причиной этих отказов является неустойчивая работа фотодиодов ФД-8К. Основным дефектом фотодиодов оказались переменная проводимость контактных переходов. Причиной этого был токопроводящий клей, который в процессе эксплуатации изменяет свою электропроводимость. Было установлено, что перемежающийся и неравномерный характер изменения проводимости практически не выявляется при контроле параметров методами, предусмотренными ТУ. Для выявления дефектных фотодиодов было предложено разработать и внедрить дополнительные проверки методами диагностического прогнозирующего контроля и индивидуального прогнозирования, которые позволяют более объективно оценить физическое состояние кристалла контактных переходов.

Кроме того, для обеспечения стабильности работы приборов были предложены следующие меры:

1. Модернизировать конструкцию фотодиода ФД-8К.
2. Передать производство фотодиодов другому предприятию.
3. В приборе заменить лампочки ОПЗ-025 на излучающий диод, а транзистор ОС – на микросхему 159НТ101А.
4. Разработать и внедрить сквозной прогнозирующий контроль фотодиодов, узлов и прибора.

Была предложена методика прогнозирующего контроля фотодиодов ФД-8К. Она предусматривает 4 этапа дополнительных проверок.

1 этап: в нормальных условиях ($t = +20 \pm 5$ °С) на фотодиод подается прямое напряжение 0,5 В; затем напряжение плавно увеличивается до значения, при котором прямой ток достигает значения 10 мА; при этом подаваемое напряжение не должно превышать 0,9 В; в случае, если напряжение будет выше 0,9 В – фотодиод отбраковывается.

2 этап: фотодиод помещается в термостатирующее устройство, обеспечивающее $t = +60 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ и в течение 5 минут производится непрерывный мониторинг прямого тока; при этом не допускается скачкообразное изменение $I_{\text{пр}}$ и монотонное уменьшение прямого тока более, чем на 5 %.

3 этап: с фотодиода снимается напряжение и производится выдержка при $t = +60 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 48 часов.

4 этап: по окончании выдержки без снижения температуры фотодиода на него подается прямое напряжение 0,5 В и производится повторный мониторинг прямого тока в течение 5 минут.

Фотодиоды, прошедшие дополнительные испытания в объеме данной методики, допускаются к использованию при изготовлении узлов для приборов.

Для предприятия-изготовителя узлов была также разработана методика прогнозирующего контроля этих изделий. Она состоит из двух частей. Первая часть включает входной прогнозирующий контроль фотодиодов в объеме описанной выше методики производственного контроля. Вторая часть предусматривает дополнительные испытания узлов с целью выявления установленных в них фотодиодов с пологой (изменяющейся со временем вольтамперной) характеристикой. Предварительно проверяют основные параметры (крутизна, выходное напряжение, стабильность тока) на соответствие ТУ. Затем проводят дополнительные испытания в следующей последовательности.

1. При нормальных условиях устанавливают ток, равный 50 мА. В течение 5 минут контролируют напряжение на фотодиодах, оно не должно превышать 1,2 В и не должно изменяться более, чем на 10 %.

2. Включить разогрев узла. Установить и поддерживать ток через фотодиод $I_{\text{пр}} = 10 \text{ мА}$. В течение 5 минут контролировать напряжение. Выключить обогрев. В течение 5 минут контролировать напряжение. При этом напряжение не должно превышать 0,9 В и не должно изменяться более, чем на 10 %.

3. Выдержать узел после отключения обогрева в нормальных условиях 30 минут и поменяв полярность подаваемого напряжения повторить проверки при нормальных условиях и с обогревом.

4. После выдержки 30 минут в нормальных условиях проверить параметры узла на соответствие ТУ.

По положительным результатам узлы допускаются к использованию при изготовлении приборов.

Для предприятия-изготовителя приборов было рекомендовано увеличить объем проверок, и была предложена следующая методика их отбраковки:

1. Дополнительные испытания узлов (снятие ВАХ фотодиодов) на этапе входного контроля.

2. Проверки прибора в объеме приемо-сдаточных испытаний.

3. Испытания на воздействие центробежных нагрузок.
4. Ресурсные наработки.
5. Проверки неправильности работы.
6. Транспортные испытания.

Результаты проверок оказались положительными, что позволило осуществить отбраковку приборов при наземных и летных испытаниях изделий (РН «Союз»). Результаты были также положительными. Это позволило увеличить надежность изделия в процессе полета.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МИКРОСХЕМ СЕРИИ 286

Тюлевин С.В., Архипов А.И., Арзамасцев И.И.

СГАУ им. акад. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия

Доклад посвящен вопросам электрофизической диагностики полупроводниковых микросхем серии 286, выполненных по биполярной технологии, и выполняющих функции вторичных источников питания в космической аппаратуре. Производится контроль и анализ обратной ветви ВАХ входных транзисторов. Для этих целей используется тестер 14-ТКС-100.

Одним из факторов, ограничивающих надежность РЭС является качество комплектующих электрорадиоизделий (ЭРИ).

Существующая система поставок комплектующих не дает необходимых гарантий их качества в условиях нестабильных экономических связей. Решающее значение в комплектации высоконадежных РЭС приобретает организация и совершенствование входного контроля ЭРИ, введение дополнительных видов отбраковочных испытаний и контроля на основе интегральной электрофизической диагностики. Чтобы при этом повышение достоверности отбраковки не достигалось путем роста трудоемкости и капиталовложений, целесообразно использовать методики диагностики, реализуемые в едином технологическом цикле и на оборудовании для измерения традиционных параметров ТУ.

В работе решается задача разработки автоматизированного рабочего места контроля вторичных источников питания, реализованных в виде микросхем серии 286 на базе тестера для измерения статических параметров транзисторов 14-ТКС-100.

Предложена методика диагностики и отбраковки потенциально ненадежных микросхем серии 286 по виду обратных ветвей вольт-амперных характеристик.

Определены границы зон отбраковки для различных типов микросхем серии 286. Разработано дополнительное программное обеспечение для реализации процедур диагностики.

Для целей контроля параметров обратной ветви ВАХ алгоритм программы классификации имеет линейную структуру и состоит из последовательности тестов. Внутри каждого теста содержится информация для измерения одного параметра. В процессе измерения прослеживается, чтобы значения параметра не превышало указанного в тесте. Измеренный параметр сравнивается с одним или несколькими значениями величин, которые считаются нормой. В зависимости от результата сравнения значения параметра с нормой выдается указание о присвоении определенной классификационной группы. Таким образом, программа состоит из набора однотипных тестов, последовательная работа которых представляет цикл с шаговым изменением режима измерения параметра.

Внедрение рабочего места позволит повысить надежность входного контроля микросхем на заводе-изготовителе.

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА РИСКА ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Калакутский В.Л., Калакутский Л.И.

¹ *ЗАО ИМЦ «Новые приборы», ГОУ ВПО, Самара, Россия,*

² *СГАУ им. С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Самара, Россия*

Изделия медицинской техники (ИМТ) представляют собой сложные электронные системы. В настоящее время остро стоит проблема их безопасной эксплуатации и анализа появления эксплуатационных рисков.

Разработка алгоритмов срабатывания сигнализации экстренных состояний для автоматизированных мониторинговых систем слежения за состоянием пациентов представляет собой сложную задачу диагностики состояний на основании анализа значений текущих физиологических показателей.

Принятие решение о включении сигнализации экстренных состояний в медицинских диагностических системах принимается программными средствами мониторинговых систем на основе обработки регистрируемых быстро меняющихся физиологических показателей с целью обеспечения функциональной безопасности, выявления угрожающих состояний с последующим информированием медперсонала о необходимости проведения медицинских мероприятий. Современное мониторинговое оборудование, установленное в реанимационных палатах стационаров, выдает большое количество сигналов тревоги, ложное появление которых снижает внимание медперсонала

ла, что в дальнейшем может стать причиной пропуска опасных событий, которые могут нанести вред пациенту.

Снижение риска ложной тревоги может проводиться на основе требований по анализу и управлению рисков, предъявляемых к устройствам медицинской техники ГОСТ Р ИСО 14971–2010, введенный в действие на территории Российской Федерации для производителей медицинской техники.

Опасность, возникающая вследствие выдачи оборудованием ложной тревоги или же пропуска им опасной ситуации, идентифицируется разработчиком на этапе проектирования, затем производится оценка величины риска такой опасности. Далее, величина риска рассматривается с точки зрения допустимости и в случае недопустимости такого риска, разработчик проводит анализ вариантов технических решений, которые приводят к снижению риска. Для проведения дифференциации предложенных решений по величине риска предложена модель анализа риска.

Данная модель представляет интегральную оценку комплексных показателей вероятности появления ложной тревоги и степени их тяжести. В основе этих оценок лежат квалиметрические методы: дифференциальные и комплексные оценки, основанные на экспертных методах. Такую оценку можно интерпретировать в виде точки на плоскости состояний «тяжесть наносимого вреда – вероятность возникновения». Координаты точки риска определяются дескрипторными шкалами, которым для количественной оценки риска приводятся в соответствие числовые значения в диапазоне от 0 до 1. Так, при использовании шкал, содержащих 6 градаций параметров, числовые значения координат соответствующей точки риска определяются по табл. 1.

1. Числовые значения для дескрипторов по шкале оценки тяжести вреда и вероятности его происхождения

Дескриптор по шкале оценки тяжести с наносимого вреда	Пренебрежимо малый вред	Незначительный вред	Малый вред	Критический вред	Серьезный вред	Катастрофический вред
Дескриптор по шкале оценки вероятности р наносимого вреда	Невероятное событие	Маловероятное событие	Незначительное событие	Случайное событие	Вероятное событие	Частое событие
Значение	$s \leq 0,17$	$0,17 < s \leq 0,34$	$0,34 < s \leq 0,51$	$0,51 < s \leq 0,68$	$0,68 < s \leq 0,85$	$0,85 < s \leq 1,0$

Величина риска предложенного технического решения вычисляется как расстояние от точки на фазовой плоскости, с соответствующими значениями вероятности возникновения и тяжести вреда до границ зон риска. Всего принимается три зоны: зона широко допустимого риска (ШДР), зона минимального допустимого риска (МДР), зона недопустимого риска (НДР). Зоны риска могут быть заданы различными способами как аналитически, так и точно.

Полученные расстояния от точки, соответствующей анализируемому риску, до границ областей допустимости сравниваются между собой. Наиболее приемлемым решением выбирается такое, при котором риск пропуска ложной тревоги максимально снижается по сравнению с начальным риском и лежит в зоне ШДР или МДР.

Таким образом, предложенная модель позволяет проводить количественную оценку состояний системы в плоскости риска, выявлять пути снижения риска, что определяет ее применение в проектировании медицинских мониторинговых систем с учетом требований функциональной безопасности.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Коннов В.В., Пронин Н.С., Коннов Вл.Вл.,
Кузнецов А.М., Коннов А.В.

ЗАО НПЦ «Молния», Москва, Россия

Секция № 16. АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Руководители секции: Ковалев А.В., Усачев Е.Ю.

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ БЕТАТРОНОВ В АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Волков В.Г., Зрелов Ю.Д., Касьянов В.А., Касьянов С.В.,
Клименов В.А., Рычков М.М., Филимонов А.А., Штейн М.М.
Институт неразрушающего контроля ТПУ, Томск, Россия

В докладе указаны основные характеристики малогабаритных бетатронов, производимых в Томском политехническом университете, приведены результаты применения бетатронов в системах цифровой рентгенографии для досмотрового контроля крупногабаритных объектов и транспорта. Приведены сравнительные характеристики досмотровых комплексов. Рассмотрены досмотровые комплексы, как с использованием бетатронов в качестве источника излучения, так и с другими источниками.

АППАРАТУРА ДЛЯ ДОСМОТРА ЛЕГКОВОГО И ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА

*Щетинкин С.А.¹, Аметов В.И.¹, Чахлов С.В.², Усачёв В.Е.¹,
Чумаков Д.М.¹, Сысоев А.В.¹, Дикаев Ю.М.¹, Скачко А.В.¹,
Штейн М.М.², Касьянов В.А.²*

¹ *Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики (МИРЭА), Москва, Россия*
² *Томский политехнический университет, Москва, Россия*

В докладе приводится описание созданных лабораторией ТСНК систем для досмотра легкового и грузового транспорта. Мобильная рентгеновская установка для досмотра легковых автомобилей и микроавтобусов состоит из рентгеновского аппарата, системы формирования веерного пучка, системы детектирования высокого разрешения и системы перемещения объекта контроля. Перемещение объекта контроля осуществляется на поездах с помощью электропривода со скоростью 0,2 м/с. Рентгеновский аппарат дает возможность работать с двумя энергиями, что позволяет реализовывать метод двухэнергетической радиографии и эффективно классифицировать объекты по эффективному атомному номеру. Доза, получаемая

объектом в несколько сотен раз меньше, чем доза обследования при флюорографии. Инспекционно-досмотровый комплекс для контроля крупногабаритных транспортных средств состоит из бетатрона с энергией 9 МэВ, системы формирования двух расходящихся веерных пучков, двух систем детектирования высокого разрешения с системой защиты от рассеянного тормозного излучения, бетатрона с изменяемой энергией от 4.5 до 9 МэВ и дополнительной линейкой высокой чувствительности. Все элементы установлены на единой подвижной раме, которая может перемещаться со скоростью 12...36 м/мин. Все технологическое оборудование располагается в радиационно защитном помещении. Наличие нескольких ракурсов увеличивает вероятность обнаружения запрещенных предметов и позволяет интерактивно получать трехмерную информацию об объекте контроля.

ДВУХЧАСТОТНОЕ АВТОГЕНЕРАТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ

Поляхов М.Ю., Хвостов А.И.

*Московский энергетический институт (ТУ),
Москва, Россия*

Доклад посвящен вопросам оценки свойств электропроводящих объектов с помощью двухчастотного автогенераторного метода. Результаты исследований могут быть использованы при построении автогенераторных селективных металлодетекторов.

Известен двухчастотный способ измерения толщины немагнитных электропроводящих покрытий [1], в котором по результатам обработки амплитудно-фазовых значений выходного напряжения второго преобразователя определяют толщину контролируемого покрытия.

Недостатком способа является низкая точность измерений, вызванная неизбежными погрешностями при измерении амплитуды и фазы переменного напряжения.

Известен также способ измерения толщины диэлектрического покрытия на электропроводящем основании [2], заключающийся в измерении трёх значений резонансной частоты контура автогенератора при известных толщинах покрытия и определении на их основе величины измеряемой толщины по соответствующей ей частоте.

Недостатком способа является низкая точность измерения, вызванная его однопараметровостью, не позволяющая, например, произвести отстройку от влияния проводимости основы на результаты измерения толщины покрытия.

В предлагаемом способе [3] преследуется цель повышения точности контроля.

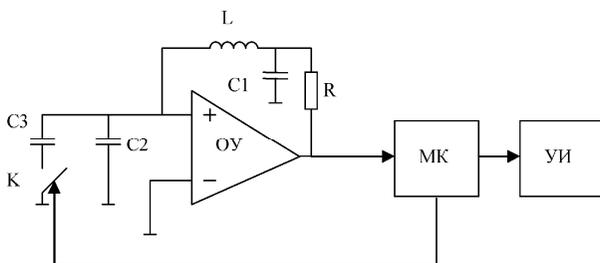


Рис. 1. Схема построения устройства

Указанная цель достигается за счет того, что конденсаторы колебательного контура автогенератора выполнены составными и могут быть подключены к нему частично или полностью, что приводит к изменению резонансной частоты. Измерения резонансной частоты контура автогенератора производят последовательно при разных значениях величин этих конденсаторов, а об изменении свойств объекта контроля судят по совокупности изменений частот.

На рис. 1 приведена схема построения устройства. Катушка индуктивности L образует совместно с конденсаторами $C1-C3$ колебательный контур, резонансная частота которого определяет частоту выходного сигнала операционного усилителя ОУ. Резонансная частота контура может быть изменена за счет изменения состояния аналогового ключа K .

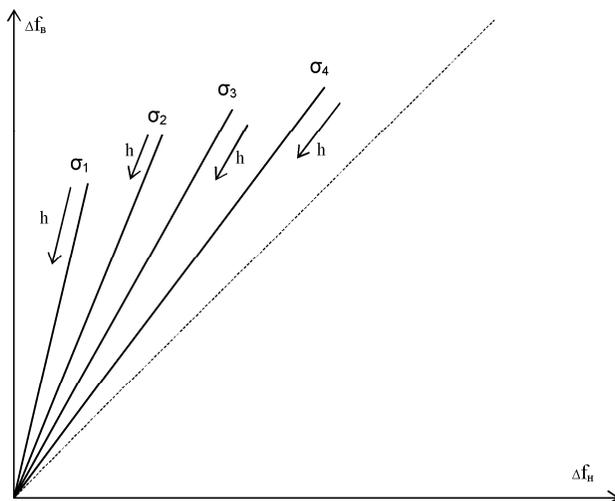


Рис. 2. Зависимость приращений частот от свойств объекта

Микроконтроллер МК производит поочередное измерение частоты выходного сигнала ОУ для двух различных положений ключа К. Далее производится вычисление приращений каждой из частот, за начальные значения которых приняты частоты в отсутствии объекта.

На рис. 2 приведены результаты измерений для различных значений толщины диэлектрического покрытия h и проводимости основания σ , при использовании двух частот f_n и f_v для системы координат, построенной для приращений этих частот.

Результаты приведенные на рисунке соответствуют случаю, когда $f_v > f_n$, а $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < \sigma_4$. Результат получен для немагнитных материалов. Аналогичные зависимости могут быть получены и для ферромагнитных электропроводящих материалов, но графики соответствующих зависимостей расположатся во втором и третьем квадрантах системы координат.

Результаты очень похожи на годографы вносимых сигналов ВТП на комплексной плоскости и могут быть использованы для отдельной оценки проводимости и зазора, что невозможно для однопараметровых методов. В отличие от способов, использующих амплитудно-фазовые соотношения выходного сигнала ВТП, в данном случае используются измерения приращений частот, которые не требуют сложных устройств и обеспечивают высокую точность.

Литература

1. Патент РФ № 2184931. МПК G01B 7/06, опубликовано: 10.07.2002
2. Заявка на изобретение РФ № 99127414/28, МПК G01B 7/06, опубл. 10.10.2001).
3. Патент РФ № 2371672, МПК G01B7/06, опубликовано: 27.10.2009, Бюл. № 30.

ОБНАРУЖЕНИЕ ЕДИНИЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ «СОГЛАСНЫЙ-ГЛАСНЫЙ-СОГЛАСНЫЙ» И ПРИМЫКАЮЩИХ ЭКСПЛОЗИВНЫХ СОБЫТИЙ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЧЕВОМ СИГНАЛЕ.

Коршаков А.В.

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Системы распознавания речи сулят значительные блага для современного общества, и могут найти самые разнообразные применения. Рассматриваемые алгоритмы могут существенно упростить повседневную жизнь, облегчая такой время-затратный труд, как набор текста на компьютере. Возможны также разнообразные применения в области робототехнике [1].

В общем, необходимо выделить несколько уровней «распознавания» речи. На первом из них, акустическом уровне, или уровне фонем, происходит разделение «входящей» речи на независимые языко-специфические фонетические единицы. Такое разделение в современных системах работы с речью не может быть произведено достаточно точно и в полной мере, что связано с такими явлениями речи, как просодическая вариация, интонация и т. п. явления. Примером является сарказм. Из-за нечёткой природы естественного человеческого языка границы между отдельными единицами звучания размыты, и достаточно часто трудно полностью отделить одну фонетическую единицу от другой без существенных ошибок, особенно в полностью автоматическом режиме.

Речевой сигнал – это квазипериодический процесс, временная запись которого содержит области тишины и пики, которые могут быть соотнесены с теми или иными событиями или с произнесением того или иного значащего звука (события такого вида чаще всего являются согласными звуками). Именно эти участки составляют основную смыслопередающую часть речи. Таким образом, идентификация подобных особенностей, или событий, сигнала является первой задачей распознавания речи. Обычно такая задача решается различными методами спектрального и корреляционного анализа, используются частотно–временные зависимости для выделения особенностей и областей, содержащих отличительные признаки сигнала. Конкретика методов и подходов существенно меняется от работы к работе и от автора к автору. Использование спектрографического представления сигнала также обычно. Важным методом анализа также является компьютерный анализ корреляций звука по спектрограммам [2].

Целью данной работы было создание автоматического метода, который бы облегчил создание надежной библиотеки эталонов согласных и/или пар «гласная-согласная» и «согласная-гласная», а также комплексов «согласная-гласная-согласная», являющихся более стабильными и надёжными коррелятами смыслового содержания речи. Выделение таких устойчивых признаков является предварительным этапом при классификации с их помощью локусов речевой акустической записи различных дикторов.

Для решения поставленной задачи использовался метод локализации гласной по максимуму огибающей. Точки начала и конца во времени комплекса «согласная-гласная-согласная» определяются как экстраполяция до пересечения с уровнем 0-й громкости прямой соединяющей точки максимума амплитуды огибающей гласного звука и точку падения амплитуды до трети максимального. При таком «геометрическом» построении в выделяемый участок с надёжностью 95% попадают и окаймляющие гласную согласные. После этого локализованный участок может быть усреднён по различным дикторам, либо же усреднен с накоплением на материале одного диктора или в зависимости от конкретных задач обработан другим, например корреляционным методом. Рассмотренный метод прост и следовательно не требует значительных вычислительных затрат.

Литература

1. **Потапова Р.К.** «Речевое управление роботом: лингвистика и современное автоматизированные системы» Изд. 2-е, перераб. и. доп. – М.: КомКнига, 2005. – 328 с.

2. **Korshakov A.V.** THE OVERVIEW OF ON-LINE SPEECH PROCESSING ALGORITHMS FOR SPEAKER IDENTIFICATION SYSTEMS: report // 10th European Conference on Non-Destructive Testing: reports. Report № 4.5.29. М.: Publishing house Spektr, 2010. [CD].

ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ПОДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОАМПЛИТУДНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ В МНОГОКАНАЛЬНОМ МЭГ СИГНАЛЕ

Коршаков А.В.

*НИЦ «Курчатовский институт»,
Москва, Россия*

Обработка сигналов играет критическую роль в разработке новых систем мониторинга организма человека, таких, как например ЭЭГ, фМРТ, МЭГ. На сегодняшний день МЭГ – одна из технологий, которая дает возможность эффективно обнаруживать источники патологической активности в мозге безопасным и бесконтактным способом. МЭГ может использоваться в медицинских диагностических целях, в частности, перед нейрохирургическими операциями. В этой области новые алгоритмы всегда означают новые возможности. В этой работе рассматривается такой метод «слепой» обработки сигналов, как анализ независимых компонент (ICA) [1, 2]. Анализ независимых компонент (ICA – Independent Component Analysis) недавно разработанная группа методов, в основе функционирования отдельных представителей которой, может лежать, например, принцип поиска линейного представления негауссовых данных таким образом, чтобы полученные компоненты были статистически независимы или, по крайней мере, настолько статистически независимы, насколько это возможно, либо же, чтобы результирующие компоненты были декоррелированы настолько, насколько это возможно. Так как шумовые составляющие сигнала зачастую не коррелируют с полезным сигналом, то такой анализ будет полезным для определения и вычитания шумовых составляющих, определения повторяющихся информативных элементов сигнала или просто разложения на составляющие для дальнейшего анализа. Разложение многоканального сигнала на отдельные компоненты (даже в приблизительном смысле –

«сигналы независимы насколько возможно») приносит ряд преимуществ, таких, как, например частичная локализация шума в отдельных компонентах [2, 3], автоматическое выявление событийной асинхронности между каналами, возможность использования в различных каналах различных стратегий для декодирования информативного сигнала. Типичным примером шумовой составляющей био-сигнала, существенно затрудняющего анализ записей МЭГ и ЭЭГ, являются повторяющиеся, трудноустраняемые высокоамплитудные глагодвигательные артефакты и артефакты, связанные с активностью лицевой мимической мускулатуры. Рассматривается метод автоматической предобработки с целью устранения подобных событий из сигнала.

В работе анализировались многоканальные МЭГ-данные магнитометра «Neuromag» фирмы «Elekta». Инструмент обладает 306-ю сенсорами для обнаружения сверхслабых источников изменений магнитного поля мозга человека в комплексе с установкой регистрации движения глаз.

Элиминация артефактов достигается путём разложения исходного сигнала на независимые компоненты, определения по некоторому признаку шумовых компонент (в частности использовался «метод максимального падения дисперсий» [3]), нулификации шумовых компонент и обратного преобразования — сборки сигнала. В случае сингулярности матриц весов компонент обращение осуществлялось по алгоритму псевдоинверсии, что не сказывалось на качестве результата. Проведение подобной процедуры локализует и подавляет высокоамплитудные особенности разнообразного характера в многоканальном МЭГ сигнале.

Литература

1. **Hyvärinen A., Oja E.** Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural Netw.* 13, 2000. P. 411–430.
2. **Moran J.E., Drake C.L., & Tepley, N.** (2004). ICA methods for MEG imaging. *Neurology clinical neurophysiology NCN*, 2004, 72. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16012654>.
3. **Korshakov A.V., Frolov A.A., Bobrov P.D.** ON-LINE AUTOMATIC SUPPRESSION OF ARTIFACTS IN MULTI-DIMENSIONAL SIGNALS USING ICA. report // 10th European Conference on Non-Destructive Testing: reports. Report № 4.5.30. M.: Publishing house Spektr, 2010. [CD].

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДПОВЕРХНОСТНЫЙ РАДИОЛОКАТОР ДЛЯ НК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР

Ивашов С.И.¹, Разевиг В.В.¹, Васильев И.А.¹, Журавлев А.В.¹
Bechtel T.², Capineri L.³

¹*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,*
²*Franklin & Marshall College, Lancaster, USA*
³*University of Florence, Italy*

Все подповерхностные радиолокаторы по типу излучаемого сигнала можно разделить на три группы: импульсные, с непрерывным излучением и различными типами частотной модуляции и голографические радиолокаторы. В данном докладе рассматриваются радиолокаторы последнего типа. Они отличаются от двух других типов необходимостью сканирования обследуемой поверхности для регистрации подповерхностной радиоголограммы.

При зондировании объектов на небольших глубинах основное преимущество голографических радиолокаторов состоит в способности получать изображения, имеющие более высокое разрешение в плане зондирования, чем у импульсных радиолокаторов. Существует ряд приложений, при которых обследуемые объекты расположены на небольших глубинах или у самой поверхности. К ним относятся:

- поиск противопехотных и противотанковых мин;
- поиск средств технической разведки в помещениях;
- обследование строительных конструкций;
- диагностика композитных материалов.

На голографическом принципе обработки информации разработана серия радиолокаторов типа РАСКАН. Одна из последних модификаций РАСКАН-4/4000 использует многочастотный режим работы с последовательным переключением фиксированных частот. При правильном выборе диапазона частот объект на любой глубине будет виден на изображении хотя бы на одной из частот и даже один дефект под другим дефектом.

Радиолокатор РАСКАН-4/4000 состоит из антенны и блока управления, который подключается к компьютеру через USB порт. Компьютер не требует доработок, необходимо лишь установить специальное программное обеспечение для управления прибором и регистрации голограмм. Частотный диапазон находится в области 3,6...4,0 ГГц с количеством рабочих частот 5. При безопасной для персонала выходной мощности и чувствительности приемника 10^{-9} Вт прибор обеспечивает обнаружение неодно-

родностей на глубине 20 см при разрешении в плоскости зондирования 2 см.

Радиолокатор РАСКАН-4/4000 получил широкое применение и подтвердил надёжность получаемых результатов. В качестве примеров в докладе приводятся наглядные данные инспекционных обследований различных конструктивных деталей и конструкций, в частности элементов конструкций Конституционного суда в С.-Петербурге, построенного архитектором Росси в 1834 году.

Литература

1. **Продукция** и статьи коллектива Remote Sensing Laboratory при МГТУ им. Н.Э. Баумана. <http://www.rslab.ru>.

СИСТЕМА БЕСПИЛОТНОЙ МУЛЬТИРОТАЦИОННОЙ ЛЕТАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Насрулаев С.Ф.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Доклад посвящен беспилотным мультиротационным летательным аппаратам (МЛА), которые являются одним из перспективных и развивающихся направлений в области беспилотной гражданской авиации.

Данные системы могут быть использованы как дешевое и безопасное средство для получения фото и видео изображений с воздуха и нести полезный груз, а так же являться платформой для установки различного, измерительного, исполнительного и пр. оборудования.

Без пилота на борту, МЛА может проводить контроль и инспекции объектов в местах и на территориях небезопасных для человека.

Спроектированная и построенная нами беспилотная четырех – роторная система имеет высокие летные характеристики. Конструкция системы позволяет уменьшить габаритные размеры в 8–10 раз при транспортировке, сохраняя при этом жесткость. Система управления обеспечивает простое и понятное взаимодействие с оператором. В нее так же входят: подсистема визуализации полета и подсистема аварийного оповещения при потере сигнала.

Так же нами впервые было проведено исследование зависимостей летных характеристик системы от основных параметров конструкции и от настроек системы управления.

Данное исследование позволило нам подобрать параметры элементов конструкции и настройки системы управления обеспечившие значительное улучшение летных характеристик системы.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Пугачев С.В.

Mappower, Москва, Россия

Современные средства неразрушающего контроля и технической диагностики все чаще оперируют с большим объемом информации, осуществляя визуализацию структуры и быстро протекающих динамических процессов, что требует использования соответствующего программного обеспечения, а в ряде важных случаев оно становится определяющим, делая средства технической диагностики интеллектуальными.

Например, при досмотре пассажиров с визуализацией скрытых запрещённых предметов и ограниченном времени контроля используется сложный алгоритм обработки информации путём сравнения электронных образов предметов с архивом уже известных изображений и последующим выводом знака (иконки), определяющего степень опасности спрятанного предмета. Так, в частности, работают пассивные (радиометрические) микроволновые досмотровые системы «BIS-WDS Prime», разработанные компанией Brijot Imaging Systems (США). Система не «раздевает» субъекта, а выводит на экран монитора его обычное видеоизображение с наложением на соответствующий участок тела той или иной опасной «иконки».

В современном мире системы видеонаблюдения являются неотъемлемой частью систем безопасности, поэтому программное обеспечение для управления системами видеонаблюдения постоянно совершенствуется. Так, компания Group LB разработала систему «МАТРИЦА» – программное обеспечение нового поколения, предназначенное для управления сетевыми системами видеонаблюдения и ведения его архивов изображения. Другая компания GOALcity внедряет свою идеологию видеоаналитики – автоматическую запись первых кадров каждого события, выделение лиц с записью наилучшего ракурса, автоматическое оповещение экстренных, важных и плано-уведомительных событий.

Специалисты компании CIAS разработали интеллектуальные датчики и технологию «нечеткой логики» обнаружения нарушителя. Радиолучевые датчики успешно применяются для охраны атомных электростанций, военных и гражданских аэропортов, тюрем и других объектов. В цифровых датчиках этой фирмы используется так называемая «нечеткая логика», т.е. сигнал проникновения анализируется не с помощью двух параметров (порог срабатывания и время интеграции), которые описывают только один тип вторжения, а с помощью многих моделей поведения (до 256). Использование технологии «нечеткой логики» позволяет реализовывать необычные режимы работы датчиков, изменять классическую форму чувствитель-

ной зоны, уменьшать влияние посторонних предметов. Результатом является резкое уменьшение вероятности ложной тревоги и повышения вероятности обнаружения.

При использовании современных методов неразрушающего контроля и технической диагностики, особенно быстро протекающих динамических процессов, также возникают проблемы скоростной обработки информации и архивирования выделенных изображений. Так, при дефектоскопии ответственных конструкций тепловым методом большие и приповерхностные дефекты определяются с помощью простых систем (конвекционным нагревом и тепловизионной камерой) без сложных компьютерных программ. Однако более качественная и количественная оценка неоднородных дефектов сложной формы с разными глубинами их залегания осуществляется с применением импульсной термографии и дополнительным использованием специальных программно – вычислительных средств. В большинстве случаев анализ термограмм теплового динамического процесса производится путём их обычного просмотра и отбора из них тех, на которых в наибольшей степени проявляется слабый кратковременный тепловой контраст от внутренних дефектов. Вводя в этот процесс необходимое программное обеспечение, реализующее соответствующие алгоритмы, становится возможным автоматизировать технологию контроля в реальном масштабе времени, повысить производительность и исключить субъективные факторы.

Для реализации подобного программного комплекса предложены следующие решения. В качестве платформы разработки выбрана встраиваемая операционная система Windows Embedded, позволяющая производить обработку входного потока данных в реальном времени. При реализации программного комплекса используется язык C++ и библиотека OpenCV, как наиболее мощная «open source» библиотека компьютерной обработки видеопотоков на данный момент. Достоинством данной библиотеки является возможность дополнительного ускорения обработки видеопотока с помощью библиотек Intel Performance Libraries. Программное обеспечение, созданное на данной платформе, позволит повысить эффективность автоматизированного процесса контроля и диагностики.

Литература

1. **Неразрушающий контроль.** Справочник в 8 т., под общей ред. В.В. Клюева. Т. 5, кн. 2. Тепловой контроль, В.П. Вавилов. М. Машиностроение, 2004 г. 394 с.
2. **Parker J.R.** Algorithms for Image Processing and Computer Vision. Wiley; 2 edition, 2010, 504 pages.

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАБОТЫ СЕЛЕКТИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЯ

Пастухов Е.Г., Комаров Е.В., Поляхов М.Ю., Сидоров М.А.

ГОУ ВПО «Московский энергетический институт (технический университет)», Москва, Россия

В настоящее время проблема предотвращения террористических актов и различных диверсий стоит как никогда остро. Одним из наиболее эффективных способов является применение металлоискателей. Это связано с тем, что любое устройство, применяемое для этих целей, содержит металлические составляющие: активирующие механизмы, передающая аппаратура, корпус, поражающие элементы, в случае взрывного устройства. Поэтому металлоискателями оборудованы все общественные места, транспортные узлы, промышленные объекты и так далее.

Существует немало разновидностей металлоискателей, отличающихся конструктивно и по принципу действия. Наиболее распространенной группой являются вихретоковые металлоискатели, так как их принцип работы предусматривает возможность портативного конструктивного исполнения. В их основе лежит следующий алгоритм: возбуждающая катушка создает электромагнитное поле, которое наводит вихревые токи в объекте, создающие в свою очередь поле отклика, которое регистрируется приемной катушкой. Полезная информация извлекается в результате анализа этого ответного сигнала.

Доклад посвящен созданию теоретической базы для последующей разработки портативного устройства, способного не только обнаруживать металлические объекты, но и выдавать о них максимально полную информацию, а именно: материал, из которого изготовлен объект, его геометрические размеры и положение в пространстве. Также такое устройство должно быть рассчитано на поиск металлических предметов не только в центральной зоне приемной и передающей катушек, характеризуемой максимальной чувствительностью прибора, но и на некотором расстоянии от них. Последнее свойство делает прибор незаменимым для поиска скрытых нежелательных объектов, например, в строительных конструкциях, когда нет прямого доступа к объекту контроля. С учетом статистических данных о средней толщине стен дальность обнаружения металлического объекта должна быть около 200 мм. Минимальный размер объекта на таком расстоянии должен быть не более 12 мм.

Таким образом, предстояло решить следующий ряд задач. Во-первых, провести исследование физических основ взаимодействия возбуждающей катушки, объекта и приемной катушки, создать математическую модель, описывающую это взаимодействие. Во-вторых, осуществить выбор формы возбуждающего импульса, позволяющей провести численный расчет взаимодействия возбуждающей катушки, объекта и приемной катушки, и обеспечить получение максимального количества информации.

Все вычисления были произведены в среде MathCAD путем создания программного алгоритма, представляющего собой гибкую математическую модель расчета сигналов приемника с возможностью изменения различных параметров объекта.

Рассмотрим основные результаты проведенных исследований. В-первых, на основе анализа существующих форм возбуждающего импульса были сформулированы их основные недостатки и предложена оптимальная форма – трапециевидная. Качественный характер зависимостей тока в возбуждающей катушке $I_{\text{возб}}(t)$, наводимого в объекте напряжения $E_{\text{нав}}(t)$ и тока $I_{\text{нав}}(t)$ от времени можно увидеть на следующем рисунке.

Как видно из рисунка, трапециевидная форма возбуждающего импульса тока отвечает всем условиям. А именно, обеспечивается разнесение во времени действия возбуждающего импульса и регистрации данных, наводимых «откликом» в приемной катушке. ЭДС в объекте наводится только на участках с линейно изменяющимся током возбуждения. А когда ток в катушке постоянен, производная поля равна нулю и ЭДС в объекте отсутствует. Именно в этот момент предполагается регистрация наводимого в приемной катушке напряжения «отклика» от затухающего в объекте тока. Также если длительность соответствующих участков трапеции достаточна, то будет соблюдаться и условие «накачки» объекта током. Для этого необходимо, чтобы за время длительности импульса линейно изменяющегося тока возбуждения ток в объекте успевал достигнуть установившегося значения.

Также были рассмотрены два варианта решения задачи по расчету тока в эквивалентном витке при воздействии на него трапециевидным полем: кусочный анализ с помощью расчета эквивалентных схем и разложение функции возбуждающего поля в ряд Фурье, т.е. для каждой гармоники отдельно с последующим суммированием.

В ходе анализа была доказана возможность решения с помощью разложения функции возбуждающего поля в ряд Фурье и, оценив возникающую погрешность, определено количество гармоник, порядка тысячи, при котором точность метода становится допустимой.

После этого был произведен анализ распределения наведенных вихревых токов в проводящем объекте дисковой формы.

В результате исследований были сформулированы основные недостатки существующих форм возбуждающего импульса, и на их основе была выработана новая более эффективная. В ходе работы был проведен анализ взаимодействия возбуждающего импульса оптимизированной формы и объекта, представленного разными аппроксимациями. На основе этого анализа была создана математическая модель, которая позволила оценить эффективность новой формы возбуждающего импульса. Принципиальное отличие разработанной модели – это численный расчет взаимодействия трапециевидного возбуждающего импульса с проводящим объектом; анализ именно дисковой аппроксимации объекта, а не эквивалентных витков, как можно увидеть в соответствующей литературе.

СЕКЦИЯ № 17. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Руководители секции: Быков Д.Е., Кожаринов В.В.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО ХРАНИЛИЩА ОБЪЕКТА «ЛИРА»

Ермаков Е.Л., Тиванова О.В., Акылбек Н.М.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы,
Республика Казахстан*

Доклад посвящен вопросам диагностирования и оценки рисков эксплуатации трубопроводов и арматуры надземной части обвязки газоконденсатного хранилища объекта «ЛИРА». Подземные ядерные полости объекта «ЛИРА» созданы в 1983–84 гг. в центральной части соляного купола Карачаганак, на территории которого находится крупнейшее Карачаганакское газонефтяное месторождение с содержанием сероводорода до 4 %.

Газоконденсатное хранилище «ЛИРА» расположено на территории крупнейшего Карачаганакского газонефтяного месторождения, которое само, в процессе длительной эксплуатации становится экологически опасным объектом. Наряду с большим количеством сероводорода в газоконденсате содержатся радионуклиды [1], образовавшиеся вследствие ядерных взрывов, что является причиной существенного повышения уровня экологических и техногенных рисков.

Отказы трубопроводов могут быть вызваны различными причинами, связанными с развитием дефектов, возникших как при изготовлении труб, монтаже, а также повреждений, образовавшихся в процессе эксплуатации. При эксплуатации месторождений с высоким содержанием сероводорода влияние на несущую способность трубопроводов оказывает коррозионное поражение, вызванное процессами общей и локальной коррозии, а также сульфидного коррозионного растрескивания [2, 3], что приводит к уменьшению толщины стенки трубы и возникновению концентраторов напряжений, деградации свойств, снижается сопротивление зарождению и распространению трещин.

В условиях резко континентального климата трубопроводы подвержены дополнительным нагрузкам от температурных деформаций отдельных его элементов, смещении в пространстве участков труб в результате повреждения креплений, что вызывает изменение напряженно-деформированного состояния металла трубы. Синергетическое влияние этих факторов и напряжения от давления рабочей среды может способствовать ускоренному развитию дефектов в местах концентрации напряжений, разрушению и

аварийному выбросу газоконденсата. С этих позиций проблема снижения риска эксплуатации трубопроводов объекта «ЛИРА» особенно актуальна.

В связи с этим с 2003 г. проводится ежегодный мониторинг состояния толщины стенок труб, с наружным диаметром 168 и 114 мм, рабочем давлением 10,0 МПа. Трубопровод находится в эксплуатации с 1987 г. и смонтирован из стали типа 20. Наземная часть обвязки содержит большое количество запорно-регулирующей арматуры, а также шлейфовые и сбрасывающие трубопроводы, состояние которых определяется неразрушающими методами в ходе плановых ревизий. Заменяемые элементы подвергаются исследованию с применением других методов, так анализ структуры металла показал наличие локальных коррозионных повреждений, которые являются концентраторами напряжений и могут быть пропущены при ультразвуковом контроле толщины. Поэтому в 2009 г. для обнаружения локальных концентраторов напряжений был применен сканер-дефектоскоп магнитоанизотропный марки «StressVision-2», что позволило получить распределение параметров напряженного состояния исследованных участков трубопроводов: в зоне сварного шва, околошовной зоне и основном металле.

На основании анализа комплекса данных мониторинга, с целью снижения риска эксплуатации внесены изменения в программу ежегодного контроля состояния металла трубопроводов, оптимизирована процедура неразрушающего контроля, пересмотрены нормы браковочных толщин, проведена оценка остаточного ресурса отдельных элементов наземной части обвязки трубопроводов объекта «ЛИРА».

Литература

1. **Ядерные** испытания в сср. Том II. По ред. Михайлова В.Н., Адушкина В.В., Андрюшина И.А., Волошина Н.П. и др. www.issr-atom.ru/sss2/index.html.
2. **Гоник А.А.** Сероводородная коррозия и меры ее предупреждения, 1966, 177 с.
3. **Абдуллин И.Г.** Коррозия нефтегазового и нефтепромыслового оборудования, 1990, 72 с.

МОБИЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Порше А.¹, Миронюк Д.Ю.²

¹Холдинг «Seba KMT», Баунах, Германия

²ООО «Себа Спектрум» (Россия), Москва, Россия

Оценка состояния изоляции и гарнитур кабельных линий является основой для принятия решений по продолжению эксплуатации, ремонта или замены кабельных линий.

Состояние изоляции силовых кабелей можно определить следующими способами:

- испытание повышенным напряжением в соответствии с действующими нормативами;
- единовременное испытание диагностическими методами (диагностика).

Из практики эксплуатации высоковольтных кабельных линий известно, что положительные результаты испытаний повышенным напряжением вовсе не гарантируют безаварийную последующую работу силовых кабелей. Так, например, после успешных испытаний повышенным напряжением кабельных линий нередко происходит выход их из строя в ближайшие после этого месяцы. Установлено, что причина этого в интенсивном разрушении изоляции частичными разрядами в проблемных местах, что приводит к сокращению срока службы кабельных линий. Наиболее опасны испытания повышенным напряжением для кабельных линий с большим сроком службы или низким качеством монтажа, уже имеющих высокий уровень частичных разрядов в проблемных местах.

Объективные данные о техническом состоянии силовых кабелей можно получить современными диагностическими методами, которые реализованы в лаборатории для диагностики силовых кабелей.

Данная лаборатория предназначена для оценки:

- состояния кабельной линии;
- состояния и качества монтажа соединительных муфт и концевых заделок;
- качества соблюдения технологии прокладки кабельной линии;

Диагностика разделяется на два вида:

- интегральная диагностика, использует метод измерения возвратного напряжения, для кабелей из бумажно-масляной изоляции и метод тока релаксации для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена/ полиэтилена.
- локальная диагностика, использует метод частичного разряда для любого типа изоляции кабелей.

Диагностика силовых кабелей позволяет:

Своевременно обнаружить проблемное место в кабеле, что позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по техническому состоянию;

Получать реальную картину состояния кабельной линии, что позволяет вести паспортизацию кабеля;

Контролировать качество прокладки кабелей при прямо-сдаточных работах;

Измерять опасные уровни частичных разрядов;

Оценить влажность изоляции.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ДЛЯ ДИАГНО- СТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СКВАЖИН

Рубцов М.Г.

СамГТУ, Самара, Россия

В докладе рассмотрена возможность использования нового метода исследования скважин – гидрогеохимического каротажа для решения некоторых задач по определению технического состояния обсадных колонн скважин.

Анализ технического состояния обсадных колонн скважин (нефтяных, нагнетательных, наблюдательных, водозаборных) является одной из актуальных задач при их эксплуатации. Для решения данной задачи применяются различные методы. Так, например, в промысловой геофизике для определения негерметичности обсадных колонн широко используются методы, основанные на термометрии, расходомерии при параллельном проведении либо свабирования, либо компрессирования. Также широко используется электромагнитная дефектоскопия. Данные методы порой являются дорогостоящими за счет необходимости проведения дополнительных работ и небольшой скорости каротажа.

Гидрогеохимический каротаж основан на использовании ионоселективной потенциометрии, позволяющем определять ионный состав флюида. Помимо этого, в измерительной аппаратуре, разработанной для реализации данного метода, имеется измерительный канал для определения потенциала в скважине, вызванного различными факторами. Такими факторами могут быть химический состав флюида, коррозия металлической колонны и ее негерметичность. Анализ комплекса измеряемых гидрохимических параметров и результатов измерения потенциала, полученных при проведении фоновой каротаж, позволяет сделать предварительные выводы о коррозии колонны и ее негерметичности. Данные результаты позволяют более точно локализовать место для последующего детального исследования, что в целом снижает стоимость проведения всего комплекса работ. Гидрогеохимический метод позволяет по ряду признаков определять негерметичность как металлических, так и пластмассовых обсадных колонн.

В докладе приведен большой объем результатов работ, проведенных с использованием данного метода, и проанализированы полученные результаты.

Использование данного метода позволяет расширить возможности проведения геофизических исследований в скважинах различного назначения.

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Чертеc К.Л., Тупицына О.В.
ГОУ ВПО СГТУ, Самара, Россия

Предложена комплексная геоэкологическая система исследования техногенно нарушенных территорий, включающая классификацию техногенных образований в качестве элементов трансформируемой геосреды; оценку состояния и разработку модели строения техногенных образований с учетом свойств компонентов их формирующих, состояния самого массива и видов его взаимодействия с окружающей средой. В качестве инструмента оценки предлагается использовать интегральный показатель стабильности техногенного образования. Представлен алгоритм определения интегрального показателя стабильности. Результатом оценки взаимодействия «техногенное образование-окружающая среда» является выбор направления и метода производства восстановительных работ.

Развитие городов и интенсивная деятельность промышленных предприятий сопровождается деградацией естественных природных ареалов и появлением техногенно-нарушенных территорий. Под техногенно-нарушенными территориями можно понимать совокупность техногенных образований и природных компонентов, взаимосвязанных в своем размещении и развивающихся во времени как единое целое в условиях непрерывного взаимовлияния. С учетом данного определения техногенное образование можно рассматривать в качестве элементарной территориальной единицы геосреды, создаваемой при реализации хозяйственной деятельности.

Результаты комплексных экологических исследований показывают, что техногенные образования оказывают наибольшее негативное влияние на компоненты геосреды.

Восстановление качественных показателей техногенно-нарушенных территорий для возможности их дальнейшего освоения требует проведения комплекса восстановительных работ.

Существует огромное разнообразие методов и направлений геоэкологической рекультивации нарушенных территорий, начиная от элементного демонтажа объектов и заканчивая принципом создания «зеленых» лужаек. Их реализация требует значительного объема рекультивационных материалов, в качестве которых, зачастую, используются природные почвогрунты. Постоянно возрастающий дефицит почвогрунтов сдерживает рекультивацию и приводит к удорожанию восстановительных работ.

Значительные финансовые вложения часто неэффективны, так как направлены, преимущественно, на достижение формального технического результата и не затрагивают вопросы, связанные с ассимиляцией техногенных образований в границах нарушенных территорий компонентами геосреды.

Анализ известных методов восстановления техногенных территорий и опыта их реализации в Самарской области показал необходимость разработки комплексной системы диагностики состояния техногенно-нарушенных территорий с целью их восстановления.

Комплексная система диагностики состояния техногенно-нарушенных территорий заключается в оценке их состояния для обоснования выбора необходимых методов производства рекультивационных материалов и ведения восстановительных работ вплоть до полной ассимиляции компонентами геосреды. В результате появляется возможность создания низкозатратных способов и технологий восстановления нарушенных территорий с максимальным экономическим и экологическим эффектом. Главным критерием жизнеспособности предлагаемой системы является максимальная простота сооружений и технологий, а также доступность средств воплощения теоретических положений и проектных решений на практике.

Основным элементом предлагаемой системы диагностики техногенно-нарушенных территорий является алгоритм оценки состояния и разработки модели строения техногенных образований с учетом свойств компонентов их формирующих, состояния самого массива и видов его взаимодействия с окружающей средой.

Известны различные методы оценки состояния техногенных массивов, природных компонентов, в том числе и подмассивной геологической среды. При этом, возможно сравнение по отдельным показателям, а обобщенная оценка весьма затруднена. Для оценки состояния массива как геоструктурной модели, находящейся в состоянии динамического взаимодействия с окружающей средой, необходим показатель, позволяющий комплексно оценить текущее состояние массива, спрогнозировать его возможные изменения и наметить направления и способы ведения восстановительных работ.

В качестве инструмента оценки автором статьи предлагается использовать интегральный показатель стабильности техногенного образования.

Приступая к определению значения интегрального показателя, предлагается исходить из гипотезы, что с проведением восстановительных работ в границах техногенного образования взаимодействие с компонентами ОС не прекращается. Природа этого развития разнородна и противоречива. Моменты подъема уровня и интенсивности техногенной нагрузки сменяются стабилизацией и спадом. Изменение функций происходят гетерохронно. Преобразования претерпевают как уровневые, так и структурные характеристики техногенного образования.



Рис. 1. Этапы разработки интегрального показателя стабильности (ИПС) техногенных образований

Этапы определения численного значения интегрального показателя представлены на рис. 1.

Определение интегрального показателя состояния техногенного образования сводится к выбору из множества показателей основных, наиболее полно характеризующих его, согласно теоретическим представлениям; разработке для этих показателей балльных оценок и оценке их значимости на основе экспертных заключений. Полученное значение интегрального показателя стабильности не только объективно отражает текущее состояние техногенных образований, но и позволяет получить прогноз на ближайшую перспективу, в том числе и после проведения восстановительных работ.

АППАРАТНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рубцов М.Г., Купер В.Я., Тян В.К.

СамГТУ, Самара, Россия

В докладе рассмотрены основные вопросы методологического и аппаратного обеспечения создания эффективной технологии оперативной диагностики состояния водных объектов на базе современных средств измерения.

Система мониторинга и диагностики, реализующая такую технологию, должна иметь единую методологию и современные технические сред-

ства оперативного получения, обработки и анализа информации о состоянии контролируемых водных объектов.

Такая технология позволяет успешно решить следующие актуальные проблемы:

- контроль трансграничного переноса загрязняющих веществ на крупных реках;
- обоснованное определение границ санитарно-защитных зон источников водоснабжения из поверхностных и подземных вод;
- оперативное обнаружение аварийных (чрезвычайных) ситуаций, прогнозирование их развития, обеспечение экологической безопасности населения.

Технология оперативного автоматизированного мониторинга включает в себя две взаимосвязанные составляющие:

- периодический автоматизированный контроль;
- непрерывный автоматизированный контроль.

Периодический контроль для поверхностных водных объектов предполагает определение в отдельные, сравнительно редкие моменты времени качества воды и гидрологических параметров в некоторых сечениях реки, выбор которых зависит от целей контроля, местных гидрологических особенностей и структуры источников загрязнения. В этом случае с помощью автоматизированной измерительной аппаратуры производится съемка распределения ряда показателей качества воды и гидрологических параметров по сечению реки путем зондирования. Перечень контролируемых параметров должен быть небольшим (8–12 параметров) и должен включать в себя, в первую очередь, интегрально-диагностические показатели, позволяющие оценить уровень загрязнения и характер распределения загрязняющих веществ по сечению реки.

На основе полученных данных оперативно определяется необходимый минимум репрезентативных точек сечения реки, в которых берутся пробы воды. Взятые пробы подвергаются лабораторному многокомпонентному анализу стандартными методами. Используя данные, полученные при зондировании, и данные лабораторного анализа, осуществляют моделирование распределения и расчет количества переносимых загрязняющих веществ.

Проведение подобной съемки в различных сечениях реки дает возможность построить адекватные модели переноса загрязняющих веществ на данной акватории в различных гидрологических ситуациях. В свою очередь, эти модели позволяют обосновано устанавливать границы санитарно-защитных зон, прогнозировать динамику распространения аварийных, залповых выбросов и обосновано принимать меры по защите здоровья населения.

В то же время оперативное обнаружение аварийных ситуаций требует применения непрерывного автоматизированного контроля. Для осуществления оперативного контроля необходимо создать стационарные автоматизи-

зированные посты. Такой пост должен содержать измерительный модуль, автоматический пробоотборник и процессорный контроллер с блоком связи. Практически непрерывно (без взятия проб) автоматически измеряется ряд параметров воды, характеризующих ее качество, и оценивается нормальность или аномальность ситуации в точке контроля. В том случае, когда фиксируется возникновение аномальной ситуации, автоматически производится пробоотбор, а необходимая информация немедленно передается на центральный компьютерный пульт, связанный со всеми стационарными постами. Взятые пробы воды должны быть оперативно доставлены в лабораторию для детального анализа стандартными методами.

Таким образом, решение комплекса задач периодического автоматизированного контроля переноса загрязняющих веществ является как самостоятельной проблемой, так и необходимым этапом решения задачи непрерывного автоматизированного контроля. В то же время оба вида контроля должны иметь единую методологическую и техническую базу, обеспечивающую их взаимодействие и сопоставимость результатов.

Учитывая тот факт, что распространение загрязняющих веществ в подземных водах происходит со значительно меньшими скоростями, по сравнению с поверхностными водами, для осуществления диагностики их состояния возможно ограничиться только периодическим автоматизированным контролем.

Анализ технических требований к автоматизированным средствам измерения параметров вод позволяет сделать следующие выводы:

- по интегральным показателям качества воды (температура, удельная электропроводность, рН, Eh) должны быть обеспечены высокая точность измерений и малая разрешающая способность;
- необходим большой диапазон измерения концентраций отдельных загрязняющих веществ;
- необходимо весьма высокое быстродействие методов и средств измерений;
- высокая точность измерений должна быть обеспечена в тяжелых условиях эксплуатации (большой диапазон температур, давлений и влажности);
- необходимо обеспечить долговременную стабильность метрологических характеристик, а следовательно, большие интервалы времени между калибровками и большие межповерочные интервалы;
- важными требованиями, в значительной мере определяющими эффективность автоматизированной системы контроля, являются требования высокой надежности и удобства эксплуатации средств измерений.

Технической основой для реализации предлагаемой методологии контроля могут стать мобильные измерительные комплексы типа «ХИТОН» и портативные приборы типа «РОТАН», предназначенные для зондирования водной среды и позволяющие выполнить автоматизированную съемку па-

раметров вод (поверхностных и подземных) в режиме реального времени. Стационарный измерительный комплекс типа «ХИТОН-А» может явиться основой для создания стационарной системы непрерывного автоматизированного контроля качества водной среды.

В докладе приведены конкретные результаты работ, проведенных с использованием предлагаемого методологического подхода и указанной аппаратуры, и показана их эффективность в различных условиях.

КОМПОЗИТНЫЙ ХИНГИДРОННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ pH ПРИРОДНЫХ ВОД

Романенко С.В., Раденков Т.А.

Томский политехнический университет, Томск, Россия

pH-метрия является на данный момент неотъемлемой частью научной деятельности в самых различных сферах. pH-метрия широко применяется в научно-исследовательской практике химиков, микробиологов, почвоведов и агрохимиков в различных лабораториях как стационарных, так и передвижных, в том числе полевых. Измерение pH используется во многих производствах, где необходим контроль среды, так как во многих случаях pH является универсальным показателем состояния среды.

Электрохимические методы анализа (электроанализ), в основе которых лежат электрохимические процессы, занимают достойное место среди методов контроля состояния окружающей среды, так как способны обеспечить определение концентраций огромного числа как неорганических, так и органических экологически опасных веществ. Для них характерны высокая чувствительность и селективность, быстрота отклика на изменение состава анализируемого объекта, легкость автоматизации и возможность дистанционного управления. Кроме того, они не требуют дорогостоящего аналитического оборудования и могут применяться в лабораторных, производственных и полевых условиях.

Интенсивное развитие потенциометрии в последние годы связано, главным образом, с появлением разнообразных типов ионоселективных электродов, позволяющих проводить прямые определения концентрации многих ионов в растворе, и успехами в конструировании и массовом выпуске приборов для потенциметрических измерений.

В настоящее время существует большое число разнообразного оборудования для pH-метрии. Тем не менее, актуально совершенствование датчиков измерения pH.

Одним из наиболее распространенных pH датчиков является стеклянный электрод. Он представляет собой мембранный ионоселективный элек-

трод, являющийся частью гальванического элемента. Электрический потенциал электродной системы в растворе чувствителен к изменению содержания определенного вида ионов, что выражается в зависимости электродвижущей силы гальванического элемента от концентрации этих ионов. Данный рН датчик имеет ряд недостатков: хрупкость, достаточно долгое установление равновесного значения потенциала (несколько минут), высокое внутреннее сопротивление (от десятков до сотен МОм).

Меньшее распространение получил хингидронный электрод. Хингидрон – слаборастворимое эквимолекулярное соединение хинона $C_6H_4O_2$ и гидрохинона $C_6H_4(OH)_2$. Эти вещества образуют с ионами водорода обратимую окислительно-восстановительную систему. Хингидронный электрод имеет ряд достоинств. Он прост по устройству и приходит к равновесию быстрее, чем стеклянный электрод. Его можно применять на воздухе. Он применим во многих неводных и смешанных средах, включая водно-этанольные растворители, ацетон, фенолы и муравьиную кислоту. Основным недостатком хингидронного электрода является ограничение диапазона измерений растворами со значением рН, меньше 8. Это ограничение связано с изменением растворимости гидрохинона в щелочных растворах и его селективным растворением из хингидрона.

Данное ограничение может быть снято использованием ненасыщенных растворов хингидрона, что позволяет увеличить диапазон применения электрода в щелочной области. Ключевым моментом является дозировка хингидрона в исследуемый раствор.

В целях придания электропроводности датчику использовался порошок графита. Используя эпоксидную матрицу, удалось добиться прочности, и возможности дозировки растворяемого хингидрона. Единственный этап подготовки датчика к измерению - обновление поверхности электрода (любым абразивным материалом).

В результате был разработан композитный хингидронуглеродистый датчик для измерения рН природных вод. Разработанный датчик обладает сравнимыми с характеристиками стеклянного электрода метрологическими показателями. Кроме того, композитный датчик обладает повышенными прочностными характеристиками, высокой чувствительностью, повышенным диапазоном измерений в щелочную сторону по сравнению с классическим хингидронным электродом, легкостью использования, отсутствием специальных требований к оборудованию, условиям хранения и транспортировки.

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ БЛОК ПИТАНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Комаров Е.В., Малушин Д.С., Пастухов Е.Г., Поляхов М.Ю.

*ГОУ ВПО «Московский энергетический институт
(технический университет)», Москва, Россия)*

Доклад посвящен описанию структуры и принципа действия высокоэффективного блока вторичного электропитания для вычислительных систем неразрушающего контроля, а также математическому обоснованию оптимизации величины энергетических потерь в устройствах такого типа.

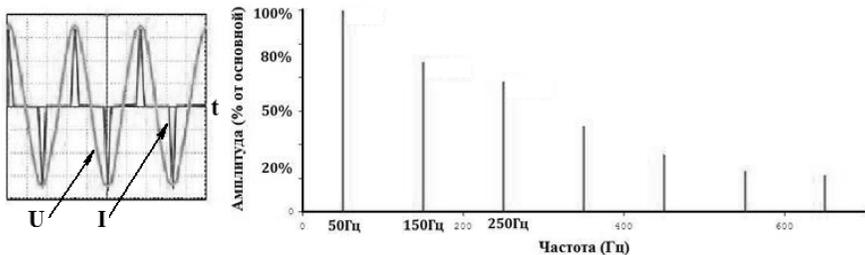
Обостряющаяся проблематика загрязнения окружающей среды обуславливает потребность в разработке качественно новых методик и способов выработки и преобразования электрической энергии.

Одним из возможных решений снижения уровня потребления и загрязнения электроэнергией, как природного ресурса, является использование высокоэффективных преобразователей энергии. Помимо прочего, повышение КПД устройства подразумевает ряд дополнительных преимуществ, как то: оптимизация массогабаритных параметров целевого прибора (и как следствие повышение его мобильности), а так же повышение надежности отдельных блоков и узлов устройства и т.д.

В контексте данной проблемы, и, с учетом нарастающей популярности компьютеризации процесса проведения неразрушающего контроля (НК) и неразрушающего оценивания (НО), целесообразно ставить задачу повышения коэффициента полезного действия вторичных источников питания для вычислительных систем (ВС) НК и НО, а также снижения уровня помех, вносимых в электрическую сеть подобными устройствами.

Легко показать, что применение стандартных блоков питания ВС НК, сопряжено с значительными энергетическими затратами. И как следствие, коэффициент полезного действия таких устройств мал (обычно он не превышает 60...70 %).

Помимо низкого коэффициента полезного действия существующие блоки питания ВС НК обладают еще одним существенным недостатком. Он связан с тем, что форма тока потребляемого от сети таким блоком имеет вид короткого импульса большой амплитуды. Быстро изменяющееся мгновенное значение входного тока создает существенные электромагнитные помехи в широком диапазоне частот. Форма входного тока и напряжения стандартного блока питания, а также спектральный состав электромагнитной помехи представлены ниже.



Подобные помехи приводят к образованию так называемой мощности искажений, определяющей дополнительные энергетические потери, как в питающих кабелях, так и в системе в целом. Помимо этого, электромагнитное «загрязнение» линии может послужить причиной функционального сбоя в работе особо чувствительных приборов и систем питающихся от той же сети.

Вследствие этого, применение подобных (стандартных) импульсных источников электропитания не представляется возможным для целого ряда типов аппаратуры неразрушающего контроля.

Задачу повышения коэффициента полезного действия и оптимизирования электромагнитной совместимости устройства можно частично свести к увеличению его коэффициента мощности. В общем случае коэффициент мощности равен отношению потребляемой приемником активной мощности к полной мощности:

$$PF = \frac{P}{S},$$

где P – мощность первой гармоники.

При этом полная мощность S для импульсных устройств равна геометрической сумме, т.е. квадратному корню из суммы квадратов активной, реактивной мощностей, а также мощности искажений: $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$, где Q – реактивная мощность, а D – мощность искажений. Численное значение коэффициента мощности для стандартного блока питания составляет не более 0,46, в то время как значение для предлагаемого блока превышает 0,95.

Структура предлагаемого блока питания полностью исключает наличие реактивных гармонических искажений Q , т.к. согласно разработанной системе управления, втекающий в устройство ток принципиально совпадает по фазе с входным напряжением.

В совместной работе между ГОУВПО «Московский энергетический институт (технический университет)», фирмой «Рен-сервис» (г.Москва) и Высшей технической школой города Констанц (Германия) была разработана и испытана новая топология электрической схемы блока питания, позволяющая значительно повысить коэффициент полезного действия (КПД) устройства, улучшить его электромагнитную совместимость и отказаться от применения в его конструкции вентилятора, представляющего собой основной источник акустического шума.

Помимо этого были также получены замкнутые математические выражения для расчета и оптимизации потерь мощности в блоках питания ВС НК такого типа.

Практические испытания разработанного опытного образца блока питания на электромагнитную совместимость показали вполне удовлетворительные результаты, соответствующие европейским нормам EN55022 (класс D).

Лабораторные исследования выявили отличные показатели, как по электромагнитной совместимости, так и по общему КПД, величина которого оказалась не меньше 91 % в полном диапазоне изменения нагрузки.

Авторский указатель

А			
Абрамов А.А.	321	Буклей А.А.	257
Абрамов А.С.	135	Булатов О.В.	75, 79
Абрамова Е.В.	116, 147	Бурков М.В.	403
Азизова А.К.	254	Бусько В.Н.	43
Акылбек Н.М.	477	Быков Д.Е.	28
Алякритский А.Л.	405	Быстрова Н.А.	116
Аметов В.И.	464	Бяков А.В.	403
Антонов А.О.	113	В	
Арзамасцев И.И.	460	Валиулина И.Р.	165
Артемьев Б.В.	257	Василенко О.Н.	37
Архипов А.В.	450	Васильев В.А.	240
Архипов А.И.	448, 450, 452, 460	Васильев И.А.	471
Б		Венгринович В.Л.	43, 264
Бадалян В.Г.	237	Веселов И.Н.	90
Базулин Е.Г.	237	Владимиров А.П.	372
Бакунов А.С.	82	Владишаускас А.	295
Бакурова Ю.А.	396	Власов И.Э.	342, 438, 444
Балиж К.С.	350	Волков В.А.	48
Балобанов Е.Н.	209	Волков В.Г.	464
Барабанов П.А.	179	Волкова Л.В.	209
Барат В.А.	340, 405	Вопилкин А.Х.	237
Бардадымова О.Н.	118	Воронков И.В.	181
Безгодов С.И.	368	Воронкова Л.В.	191
Белогусев В.Н.	431, 434	Г	
Бида Г.В.	37	Галкин Д.И.	116, 258, 259
Блинов Д.И.	296	Гамза Д.В.	97
Бобров В.Т.	24, 182	Генералов А.С.	288
Бобров С.В.	182	Главатский Д.А.	223
Бойчук А.С.	224	Гнедин М.М.	258, 259
Борисенко В.В.	205	Голикова М.И.	383
Борминский С.А.	233	Голубкова И.А.	50
Бородин Ю.В.	301	Гончар А.В.	299
Брауер Х.	154	Горкунов Э.С.	28, 36, 50, 53, 70, 87, 90, 372
Бугаенко В.М.	223		
Будадин О.Н.	31, 109, 116, 124, 136, 184, 361		

Горулева Л.С.	50, 70, 87, 90
Горшков В.А.	244
Гребеньков П.М.	162
Гринштейн М.Л.	109
Гудков С.А.	160
Гульбис М.А.	174
Гуляева О.Г.	260
Гурвич А.К.	240
Гусев Ю.Б.	299

Д

Давыдов Д.И.	69
Далин М.А.	288
Данилин А.И.	291, 306
Данилова Н.В.	390
Демин А.В.	352
Дергачев А.Н.	271
Дидин Г.А.	164
Дикаев Ю.М.	464
Дмитрович Д.В.	264
Долгих А.В.	260
Дубов А.А.	93, 278

Е

Евсеев Л.Д.	129
Егоров А.В.	415, 418, 423, 426, 431, 434
Ездаков В.А.	164
Елизаров С.В.	405
Елин А.Ф.	294
Емалетдинов А.К.	121
Ермаков Е.Л.	477
Ермоленко А.Ф.	136
Ефимов А.Г.	82, 152, 373

Ж

Жданов А.Г.	157
Жужукин А.И.	408
Жукаускас Е.	295
Жуков Н.П.	118
Журавлев А.В.	471
Журавлев О.А.	408

З

Загайнов А.В.	48
Загидулин Р.В.	40
Загидулин Т.Р.	40
Задворкин С.М.	36, 50, 53, 70, 87, 90, 372
Захаров А.Ф.	189
Захаров В.А.	45
Зверев А.В.	332
Зверев С.В.	426
Золотаревский Ю.М.	352
Зотов А.А.	45
Зрелов Ю.Д.	464
Зыкина И.А.	48

И

Иванов А.Н.	380
Иванов В.И.	342, 444
Иванов В.С.	352
Иванов И.Н.	244
Иванов С.Ю.	264
Ивашов С.И.	471
Ивкин А.Е.	153
Игнатов С.М.	253
Иголкин А.А.	400
Исаенко Ф.И.	189

К

Кагиров А.Г.	269
Кажис Р.	295
Казанцева Н.В.	69
Каковкин Д.А.	438
Калакутский В.Л.	461
Калакутский Л.И.	461
Калошин В.А.	71
Каманцев И.С.	50
Карабутов А.А.	375
Касьянов В.А.	464
Касьянов С.В.	464
Кирияков В.Ф.	189
Клименов В.А.	464

Клюев В.В.	24, 349
Клюшников В.А.	390
Кобелева Л.И.	375
Ковалев А.В.	123, 276
Кожаринов Вал.В.	341
Кожаринов Вл.В.	341
Козлов В.Н.	242
Козлова И.Н.	448, 455
Колокольников С.М.	93, 94, 95
Колосков Д.В.	170
Кольцов В.Г.	405
Комаров А.Г.	346
Комаров Е.В.	475, 488
Кондратенко Н.А.	340
Коннов А.В.	180, 368, 463
Коннов В.В.	180, 368, 463
Коннов Вл.Вл.	180, 368, 463
Коновалов Н.Н.	217, 278
Кононов Д.А.	223, 236
Конюхов Г.А.	296
Коптев А.Н.	284
Корнилин Д.В.	282
Коротеев М.Ю.	283
Корх М.К.	69
Коршаков А.В.	467, 469
Косарина Е.И.	245
Костиков Е.С.	356, 359
Костин А.В.	448
Костин В.Н.	37
Костин К.В.	84
Крайний В.И.	265, 361
Крюков А.С.	157
Крюков И.И.	378
Крючков А.Н.	400
Кудинова Е.В.	396
Кудрявцев Д.А.	82
Кудрявцев И.А.	160, 282

Кудрявцев И.А.	287
Кузеванов В.Ф.	36
Кузнецов А.М.	180, 463
Купер В.Я.	483
Курашкин К.В.	218
Кутюрин В.Ю.	184
Кутюрин Ю.Г.	31, 184, 205
Куценко Д.О.	171
Кушнер А.В.	100, 103

Л

Лавров А.Ю.	165
Левин Г.Г.	352
Левина А.В.	87
Леньков С.В.	45
Липин И.А.	329
Лифшиц В.А.	247
Лобашев А.А.	264
Лукьянов А.Л.	71, 75, 79
Лунин В.П.	154, 157, 179
Лухвич А.А.	71, 75, 79
Любутин П.С.	403

М

Мажейка Л.	295
Майникова Н.Ф.	113, 118
Макаров А.В.	43
Макарьянц Г.М.	400
Малушин Д.С.	488
Мальцева Л.А.	87
Мальцева Т.В.	87
Маргынов С.А.	250, 253
Маслова М.С.	212
Матвеев В.И.	123, 276, 349
Матюнин В.М.	94
Махарова С.Н.	90
Мелешко Н.В.	217
Меркулов А.И.	165
Миронова Т.Б.	408

Миронюк Д.Ю.	480
Мирошников В.В.	212
Михайлов В.Ф.	28
Мишакин В.В.	218, 299, 390
Мишин А.Р.	97
Мишуров К.С.	289
Модин А.Ю.	195, 215
Молин С.М.	45
Молоканов С.Я.	203
Мордовской П.Г.	90
Муравьев В.В.	209, 279, 344, 347
Муравьева О.В.	209, 344, 347
Мурашов В.В.	288, 289
Муханов Е.Е.	144, 174, 226, 439
Мякушев К.В.	388
Мясников В.М.	356, 359

Н

Наседкин А.В.	455
Насрулаев С.Ф.	472
Нестерук Д.А.	319
Никонов В.В.	321
Ничипурук А.П.	56, 69, 108
Новиков Вл.А.	100, 103
Носов В.А.	191

О

Овчарук В.Н.	334, 337
Огнева М.С.	69, 108
Одынец С.А.	223
Онегин М.А.	82
Онопко Н.В.	131
Осес Р.Х.	247
Остривной А.Ф.	264

П

Панин С.В.	403
Пантеровский С.В.	380
Панчиков В.Н.	342, 438, 444
Пастухов Е.Г.	475, 488

Пахомов Д.Н.	154
Песков Н.П.	328
Петелин А.	173
Петрищев О.Н.	212
Пиганов М.Н.	450, 458
Пилин Б.П.	263
Пилуй В.А.	195, 199
Платунов А.В.	347
Поволоцкая А.М.	70
Подымова Н.Б.	375
Покасов И.М.	446
Покасов Ю.И.	446
Покровский А.Д.	167
Полоневич А.А.	71, 75, 79
Поляхов М.Ю.	465, 475, 488
Поминов Е.И.	282
Попов О.Н.	118
Порше А.	480
Потрахов Н.Н.	247
Потудинский А.А.	287
Прокофьев А.Б.	25, 408
Пронин Н.С.	463
Пташков С.В.	316
Пугачев С.В.	473
Пудовкина Е.В.	113
Пушко С.В.	350

Р

Раденков Т.А.	486
Разевиг В.В.	471
Райшутис Р.	295
Ремезов В.Б.	386
Решетов А.А.	273, 316, 412
Ригмант М.Б.	69
Рогов И.В.	113
Ролдугина З.И.	263
Романенко С.В.	486
Ростовцев М.Ю.	405
Рубцов М.Г.	480, 483

Рычков М.М. 464
Рябкова Т.А. 331

С

Саврай Р.А. 43
Сажин С.Г. 356, 359
Сажина Е.Ю. 56
Самойлов Д.В. 250
Самокрутов А.А. 182, 202
Сандомирский С.Г. 59, 63, 66
Сафин Ар.Ил. 400
Севалкин А.А. 321
Сергеев Р.Н. 408
Сидоренко И.Г. 201
Сидоров М.А. 475

Симчук А.А. 410
Сирый В.Д. 189
Скачко А.В. 464
Скворцов Б.В. 296, 383
Скрябина Г.И. 100, 103
Слесарев Д.А. 326
Слитков М.Н. 144
Сморodinский Я.Г. 84
Соболева Е.Г. 324
Созонтов А.Н. 257
Солнцева А.В. 233
Соломенчук П.В. 283, 294
Сомова В.М. 56
Сорокин К.В. 289
Сташков А.Н. 56, 108
Сташкова Л.А. 56
Стеблев Ю.И. 28, 195, 380
Степаненко О.А. 355
Степанов А.В. 245
Степанова Н.Н. 69
Субачев Ю.В. 53
Сумкин К.С. 321
Сумкин П.С. 304
Сусарев С.В. 28

Сучков Г.М. 212
Сысоев А.В. 464
Сясько В.А. 153, 294, 439

Т

Талипов Р.Р. 121
Тарабрин В.Ф. 223, 332, 367
Тараненко Е.В. 354
Теряева О.В. 291, 306
Тиванова О.В. 477
Тимохин А.В. 195
Тихонов Д.С. 237
Ткаченко А.А. 189, 192, 197
Токарева А.В. 458
Троицкий-
Марков Т.Е. 129, 265, 361
Тронза В.И. 173
Туева Е.А. 50, 70, 90
Тупицына О.В. 481
Тюлевин С.В. 448, 450, 452,
455, 458, 460
Тян В.К. 483

У

Ульянов А.И. 48, 53
Усачев В.Е. 245, 464
Ухаров А.С. 109

Ф

Федосенко Ю.К. 163
Фигуровский Д.К. 173
Филимонов А.А. 464
Филиппенко А.А. 31, 144
Фоменко А.И. 174

Х

Харченко Е.Ф. 136
Хасиятуллов М.Г. 452
Хацина С.В. 212
Хвостов А.А. 167
Хвостов А.И. 465
Хузин Р.К. 124

Ц	
Царькова Т.П.	84
Цукерман В.Л.	264
Ч	
Чахлов С.В.	464
Чегодаев В.В.	162
Черненко П.И.	447
Чернышова Т.А.	375
Чернявский А.Ж.	291, 306
Чертес К.Л.	481
Чертов Д.Н.	294, 439
Чикалов С.Л.	368
Чистякова О.Е.	223, 231
Чулкина А.А.	48
Чумаков А.Г.	131
Чумаков Д.М.	464
Чуприн В.А.	220
Ш	
Шатерников С.В.	135, 383
Шахматов Е.В.	25, 400
Шевалдыкин В.Г.	202
Шилов А.Вл.	100, 103
Шкатов П.Н.	164, 170, 171, 173, 447
Шкода А.С.	284
Шлитерис Р.	295
Шмелев Н.Г.	378
Шопин Г.П.	452
Штейн М.М.	464
Шубочкин А.Е.	152, 373
Шукевич А.К.	71
Шумских И.Ю.	458

Щ	
Щетинкин С.А.	464
Ю	
Юмашев В.М.	244
Юхацкова О.В.	174, 184, 205 226, 439
Я	
Яковлева С.П.	90
Яцков М.В.	162
В	
Bechtel T.	471
С	
Capineri L.	471
Н	
Horak V.	393
И	
Isaac Einav	98
Л	
Liu Shiyuan	310
М	
Makarov V.	393
Р	
Richmond Hill	98
S	
Skala J.	393
W	
Wan Shengyun	310
Z	
Zhang Wenxian	310