МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

Государственное научное учреждение «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ»

БЕЛОРУССКАЯ АССОЦИАЦИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

ДЕПАРТАМЕНТ «ГОСПРОМНАДЗОР» МЧС РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

УП «БЕЛГАЗПРОМДИАГНОСТИКА»

Государственное учреждение высшего профессионального образования «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов



Сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции

Могилев, 19-20 сентября 2017 г.

УДК 620.179.1«324»(043.2) ББК 34.47 С56

Редакционная коллегия : д-р техн. наук, проф. И. С. Сазонов (гл. редактор); д-р техн. наук, доц. В. М. Пашкевич (зам. гл. редактора); канд. техн. наук, доц. С. С. Сергеев (зам. гл. редактора); д-р техн. наук, проф. А. И. Потапов; д-р техн. наук В. А. Сясько; д-р техн. наук, проф. В. Н. Костин; д-р техн. наук, проф. К. Е. Аббакумов; д-р техн. наук, проф. Б. В. Артемьев; канд. техн. наук, доц. И. В. Павлов; В. И. Кошелева (отв. секретарь)

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

Современные методы и приборы контроля качества и C56 диагностики состояния объектов: сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, НАН Беларуси, Ин-т прикладной физ. НАН Респ. Беларусь, Белорусская ассоциация неразруш. контр. и техн. диагн., Департамент «Госпромнадзор» МЧС Респ. Беларусь, Рос. общество по неразруш. контр. техн. УП диагн., И «Белгазпромдиагностика», Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 552 с. : ил.

ISBN 978-985-492-196-9.

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

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

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

УДК 620.179.1«324»(043.2) ББК 34.47

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2017

ISBN 978-985-492-196-9

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарное заседание

ВЕНГРИНОВИЧ В.Л. Мониторинг сложных объектов по техни-
ческому состоянию
КОСТИН В.Н., СМОРОДИНСКИЙ Я.Г. Перспективы развития
мобильных многоцелевых аппаратно-программных систем электро-
магнитного контроля
СЯСЬКО В.А., ГОЛУБЕВ С.С., СМИРНОВА Н.И. Перспектив-
ные методы измерения толщины защитных покрытий. Проблемы ме-
годов и метрологического обеспечения
АРТЕМЬЕВ Б.В., АРТЕМЬЕВА О.Б. Использование методов не-
разрушающего контроля для сохранения памятников культуры
потя в определении полничности локументов и ценцых бумаг
СЕРГЕЕВ С С. Практико-ориентированная полготовка калров по
сы тылы С.С. практико-орисптированная подготовка кадров по неразрушающему контролю в Белорусско-Российском уливерситете
перазрушающему контролю в велорусско-тоссийском университете ВОПИЛКИН ΔX ТИХОНОВ Л С. Современные автоматизиро
ванные средства и методы ультразвукового контроля сварных сосди-
пении оборудования и трубопроводов реакторных установок типа RRЭD
Самина 1. Лафантоскопна матариа пор и променитации и из
сскция 1. дефектоскопия материалов и промышленных из-
$\Delta FFAKVMOR K F И F Ч Анациа рассеивающих свойств ци-$
пинлического включения с неолноролной жесткостью связи на гра-
нице разлела
АББАКУМОВ К Е И Б Ч Молернизация граничных условий
при оценке рассеивающих свойств микрошероховатой границы раз-
при оценке расссивающих своиств микрошероховатой траницы раз
АНИСОВИЧ А Г. Проблемы развития металлографии в Белару-
ΓΑΕΒ Α Ρ ΜΑЙΟΡΟΒ Α Π ЗΑΧΑΡΕΗΚΟ Β Β ΟΕΡΓΕΕΒΑ
олнополной границей
$FA3V ПИН F \Gamma ABAГЯН B К Примечение псертоортогочать$
пых сигналов и сплит-сигналов для повышения скорости регистра-
ции элосип налов с помощью антенных решеток БАЗУЛИН Е Г САЛЫКОР МС Оправоление акорости про
вазялини в.г., Садыков м.с. Определение скорости про-
цольной ультразвуковой волны в изотропном однородном сварном
осдинении по эхосигналам, измеренным двумя антенными
решетками
ГУСЕВ А.П., ШУКЕВИЧ Я.И., ЛУКЬЯНОВ А.Л. Двухпарамет-

МАКАРОВА Т.И., МЕЛЕШКО Н.В. Ультразвуковой контроль	
литых боковых рам тележки грузового вагона с помощью технологии	
фазированных решеток	132
НОВИКОВ В.А., КУШНЕР А.В., ШИЛОВ А.В. Некоторые осо-	
бенности магнитографического контроля ферромагнитных объектов	
на остаточной намагниченности	138
ПАВЛОВ И.В. Применение рентгеновских инспекционно-	1 4 4
досмотровых комплексов при таможенном досмотре автомобилеи ПАВЛОВ И.В. Методика и средства контроля подлинности до-	144
кументов самоходных машин, подведомственных Гостехнадзору ПАНТЕЛЕЕВ К.В., ТЯВЛОВСКИЙ А.К., СВИСТУН А.И., ЖА-	149
РИН А.Л., САМАРИНА А.В. Дефектоскопия полимерных компози-	
ционных материалов методами зондовой электрометрии	155
ПОЗДНЯКОВ В.Ф. Оценка высоты непровара стыковых свар-	
ных соединений по величине амплитуды сигнала при ультразвуковом	1.00
контроле. ПОПЕЧИЦ В.И. Дефектоскопия материалов и изделий с помо-	160
щью модифицированных щелочью растворов красителей ПРИМАК И.У., ХОМЧЕНКО А.В., ДРАНИЦА А.Е., КАЗА-	167
ЧЕНКО Н.И. Контроль параметров тенкопленочных структур мето-	
дами рефлектометрии и волноводной спектроскопии	172
ПУДОВ В.И., СОБОЛЕВ А.С. Дефектоскопия стальных канатов.	179
СЕРГЕЕВ С.С., МЕЛЬНИКОВ С.Л. Особенности ультразвуково-	
го контроля сварных швов с использованием фазированных решеток	
и универсального сканера.	185
ШАРИН П.А., ЧУПРИН А.В., ЧУПРИН В.А., СОСНИЦКАЯ	
Г.А. Применение импульсного тока для размагничивания деталей из	104
магнитотвердых материалов	194
Секция 2. Контроль структуры и физико-механических ха-	
БРАНОВИНКИЙ И И СКУРТУ И Т ЕРОШЕНКО А С Преци-	
зионные измерения магнитных свойств электротехнической стали	200
ВЕНГРИНОВИЧ В.Л., ВИНТОВ Л.А., ПОЛУГОЛЬНИКОВ	200
П.А., ПРУДНИКОВ А.Н., РЯБЦЕВ В.Н. Особенности измерения	
плосконапряженного состояния ферромагнетиков магнитошумовым	
методом	205
ВОРОБЕЙ Р.И., ГУСЕВ О.К., ЖАРИН А.Л., ПАНТЕЛЕЕВ К.В.,	
САМАРИНА А.В., СВИСТУН А.И., ТЯВЛОВСКИЙ А.К., ТЯВЛОВ-	
СКИЙ К.Л. Методы картирования приборных слоев полупроводни-	
ковых пластин.	210
ГОРКУНОВ Э.С., ПОВОЛОЦКАЯ А.М., ЗАДВОРКИН С.М.	
Особенности поведения магнитных характеристик металла отдель-	
ных зон сварной трубы с различным исходным напряженно-	

деформированным состоянием при упругом деформировании ДРОКОВ В.Г., ДРОКОВ В.В., СКУДАЕВ	216
Ю.Д. Атомно-эмиссионный сцинтилляционный анализатор для ком-	
плексного измерения параметров металлических частиц в смазочном	
масле двигателей внутреннего сгорания (ДВС)	222
ЗАВАЛЬНЮК И.П. Контроль физико-механических свойств та-	
роупаковочных изделий молочной пролукции.	231
ЗУБКО В.И ЗУБКО Л.В СИЦКО Г.Н. Электроемкостной кон-	-01
троль электрических свойств полимерных композитов	237
ИВАШКЕВИЧИВ СТАСЬКОВНИ ФИЛИППОВ В В ШУ-	237
ПИПКИЙ БГ КАШКО И А Спектральная эплипсометрия перов-	
	244
K A Б A H O В П М МИКУ ПИЧ Р Ю ША БРОВ П В Оптические	277
параметры свето- и назерных диодов для детектирования нефтепро-	218
VОСТИЦ Р Ц СЕРЕИЦ Е П РАСИЛЕЦИО О Ц Стристирио	240
КОСТИПТ В.П., СЕГВИПТ Е.Д., ВАСИЛЕНКО О.П. СТруктурно-	
чувствительные спектральные характеристики магнитоакустической	251
	234
КРЕПЬ А.П., КИПЖАІ УЛОВ И.Ю., ПРОТАСЕПИ Т.А., ФЕДО-	
РОВ А.В. Анализ влияния подповерхностных дефектов на реакцию	
композиционного углеродного материала при ударном	2 (1)
икроиндентировании	201
КРЕНЬ А.П., МАЦУЛЕВИЧ О.В., СТЕПАНОВА К.А., КИН-	
жат улов и.ю. применение метода динамического индентирова-	
ния для контроля механических характеристик композиционных ма-	265
	203
ничипурук А.П., ОГНЕВА М.С., СТАШКОВ А.Н. Магнитная	
методика оценки остаточных напряжении в изделиях из низкоугле-	270
родистой стали.	270
пудов в.и., реутов ю.я., ригмант м.ь. перспективы	
феррозондовои диагностики слабомагнитных сталеи аустенитного	275
	275
САВИН И.С., СЛАВИНСКАЯ Е.А., ТЕРЕХИН И.В. Снижение	
погрешности от изменения магнитных свойств объектов, окружаю-	
щих вихретоковый датчик уровня расплава в кристаллизаторе с элек-	• • • •
тромагнитным перемешивателем	280
САНДОМИРСКИИ С.Г. Особенности структурной чувствитель-	
ности параметров частных петель магнитного гистерезиса сталей	286
САНДОМИРСКИИ С.Г. Синтез структурочувствительных маг-	
нитных параметров – альтернатива «многопараметровым» методам в	
магнитной структуроскопии	293
СТАСЬКОВ Н.И., ФИЛИППОВ В.В., ШУЛИЦКИИ Б.Г., КАШ-	
КО И.А. Спектрофотометрия слоя оксида цинка, допированного	_
алюминием, на пластине К8	298

СТАСЬКОВ Н.И., ИВАШКЕВИЧ И.В., МИХЕЕВ С.С. Оптиче-	
ские характеристики слоя оксида цинка, допированного алюминием	305
СТАШКОВ А.Н., НИЧИПУРУК А.П., КУЛЕЕВ В.Г., ЦАРЬКО-	
ВА Т.П. Определение величины механических сжимающих напряже-	
ний в образцах из низкоуглеродистых сталей по магнитным парамет-	
рам без проведения предварительной калибровки	311
СЧАСТНЫЙ А.С., ОСИПОВ А.А., БУРАК В.А. Оценка зависи-	
мости анизотропных свойств листового проката стали 40 от темпера-	
туры отжига	317
ХОМЧЕНКО А.В., ПРИМАК И.У., ВАСИЛЕНКО А.Н. Поляри-	
зационная интерферометрия неоднородных анизотропных сред	322
ХОМЧЕНКО А.В., ПРИМАК И.У., ВАСИЛЕНКО А.Н. Оценка	
остаточных напряжений в стекле на основе анализа рассеянного све-	
та	329
ШИЛОВ А.В., СОТСКИЙ А.Б., СОТСКАЯ Л.И. Терагерцовая	
спектроскопия воздуха при использовании волноводов с полой	
сердцевиной	335
ШУЛЬГА А.В., ШИЛОВА И.В., ХОМЧЕНКО А.В., ТОМОВ	
А.В. Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия волнопроводных	
структур	342
Секция 3. Контроль геометрических параметров объектов	
АРТЕМЬЕВ Б.В., АРТЕМЬЕВ И.Б. К вопросу модернизации ра-	
диационных толщиномеров с сохранением их метрологических	
характеристик	348
БАЕВ А.Р., АСАДЧАЯ М.В., ЖАВОРОНКОВ К.П., РАЗМЫС-	
ЛОВИЧ Г.П., ПАРАДИНЕЦ В.В. Об определении глубины поверх-	
ностного упрочнения металлов ультразвуковыми методами	355
БУРАНОК А.И., ПАВЛЕНКО А.И., РОГОЖНИК А.Н. Измере-	
ние микроперемещений при помощи емкостных датчиков	361
БУРАНОК А.И., КРОТ Я.С., ПАВЛЕНКО А.И. Создание и при-	
менение координатных систем с пьезоэлектрическими актюаторами	365
ГУНДИН А.А., ДУДОРОВ В.Г. Методика проведения субпик-	
сельных измерений объектов в микроскопии	371
КАЧАН И.А., ЮРИН Н.А. Нелинейность пьезокерамики скане-	
ров-позиционеров сканирующих зондовых микроскопов и её компен-	
сация посредством обратной связи	377
КОРОТКЕВИЧ С.В., ХОЛОЛИЛОВ О.В. Оценка толшины сма-	
зочного слоя в полшипниках качения электрорезистивным метолом	382
КОСТИН В.Н., ВАСИЛЕНКО О.Н., БЫЗОВ А.В. Локальное	
намагничивание двуслойных объектов и новый параметр контроля	
глубины поверхностного упрочнения стальных излелий	389
ФИЛИППОВ И.Н., КУРАЧЕНКО С.С. Метолы обработки лан-	- 27
ных для сканирующей интерферометрии белого света	394
	-

ЧЕРНЫШЕВ А.В., ШАРАНДО В.И., ЗАГОРСКИЙ И.Е. Вихре- токовый многочастотный толшиномер 3 ⁴	99
ШАРАНДО В.И., ЧЕРНЫШЕВ А.В., БУЛАТОВ О.В. Размагни-	,,,
чивающее устройство для повышения точности измерения толщины никелевых покрытий серийными приборами типа МТЦ 4	05
Секция 4. Мониторинг, диагностика и прогнозирование	
остаточного ресурса технических объектов	
БОЛОТОВ С.В., ГЕРАСИМЕНКО Н.В., ПОЧУИКО В.Н. Испы-	
тание системы оперативного дистанционного контроля состояния	
пенополиуретановой изоляции с цифровыми датчиками влажности 4 БРАНЦЕВИЧ П.Ю., БАЗЫЛЕВ Е.Н., КОСТЮК С.Ф. Оценка	12
технического состояния механизмов на основе анализа длительных	
вибрационных сигналов 4	18
ВОРОБЕЙ Р.И., ГУСЕВ О.К., СВИСТУН А.И., ТЯВЛОВСКИЙ	
К.Л., ШАДУРСКАЯ Л.И. Измерительный преобразователь систем	
оптической диагностики с фотоприемником на основе полупровод-	
ника с собственной проводимостью 42	24
ГРИШИН С.А., КЛИМЕНТОВСКИЙ В.В. Применение мульти-	
сенсорной системы для мониторинга технологического оборудования	
и силовых агрегатов 4	31
ГРИШИН С.А., СЕЛЯНТЬЕВ В.А., НЕДВЕЦКИЙ Н.С., КОЛ-	
ДАШОВ С.В., АЛЕКСАНДРИН С.Ю. Аппаратно-программные сред-	
ства для проведения наземных испытаний блоков бортового спек-	
трометра ионизирующих излучений 4	36
ЗАВАЛЬНЮК О.П., НЕСТЕРЕНКО В.Б. Применение неразру-	
шающего контроля в морских транспортных технологиях при экс-	
плуатации судовых корпусов 44	41
ЗАИЦЕВ Е.А., ЛЕВИЦКИИ А.С., СИДОРЧУК В.Е. Гибридные	
волоконно-оптические измерители физических параметров для си-	47
стем технической диагностики электроооорудования 44	4/
примак и.у., домченко а.в. интегрально-оптический	
датчик газовых примесей на основе нанослоев оксидных полупро-	52
СЕПИВАНОВ ВА ШЕЛЕСТЕНКО НГ КОКАШИНСКИЙ	55
ΔM Контроль и управление климатическими параметрами рентица-	
ионной установки на основе нечеткой погики	58
Сосновский и а белоцерковский м а белявин	50
КЕ. КУРИЛЕНОК А.А. КУЗНЕЧИК О.О. Метолы и средства кон-	
троля температуры нагрева и усалки порошкового слоя в процессе	
центробежной индукционной наплавки 4	63

Секция 5. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле

Kohipone	
БОРИСОВ В.И., СЕРГЕЕВ С.С., ПРОКОПЕНКО Е.Н., НОВИ-	
КОВ В.А. Расчет акустического поля излучения активных концен-	
траторов на основе параболоидных и эллипсоидных пьезопластин	469
БОРИСОВ В.И., СЕРГЕЕВ С.С., МАГИЛИНСКИЙ А.П., ПРО-	
КОПЕНКО Е.Н. Структура акустического поля излучения параболо-	
идных фокусирующих пьезопреобразователей	474
ВЕНГРИНОВИЧ В.Л., ЗОЛОТАРЕВ С.А. Исследование итера-	
ционной реконструкции методами OS-SART и OS-HBIR с использо-	
ванием упорядоченных подмножеств проекций	481
КОРНЕЕВ А.П., ЛЕНЕВСКИЙ Г.С., СТАСЕНКО И.С. Повыше-	
ние надежности грузоподъемных установок с помощью синтеза си-	
стемы управления	486
КОРНЕЕВ А.А., ТРЕТЬЯКОВ А.С., СЕРИКОВ А.П. Неразру-	
шающий контроль вентильно-индукторных приводов с применением	
компьютерных технологий	492
КОСАЧ А.А., КОВШОВ Е.Е. Сервисно-ориентированные реше-	
ния как средство повышения эффективности обработки данных не-	
разрушающего контроля цифрового производства	496
КРУТОЛЕВИЧ С.К., МИСНИК А.Е., ЛУКЬЯНОВ Е.П. Иерар-	
хический способ построения информационных систем и организации	
хранения данных для ранжирования опасных производственных	
объектов	502
КРЮКОВ А.С., ЧЕГОДАЕВ В.В., КОДАК Н.П., ЛУНИН В.П.	
Исследование численной модели вихретокового преобразователя с	
целью выбора его параметров при контроле циркониевых труб	506
МОСКВИЧЕВА И.С., КОВШОВ Е.Е. CALS – технологии в	
обеспечении неразрушающего контроля сварных соединений	513
МЫШКИН Ю.В., ПЕТРОВ К.В. Моделирование акустического	
поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных	
решеток в трубах и прутках	519
ПАВЛЮЧЕНКО В.В., ДОРОШЕВИЧ Е.С. Расчеты распределе-	
ний импульсных магнитных полей вторичных источников	530
ТРЕТЬЯК З.Ю. Применение вычислительного эксперимента для	
выбора допустимой погрешности измерительного приемочного	
контроля.	537
щукис Е.Г., Лунин В.П., Куликова Е.А. Применение не-	
прерывного вейвлет-преобразования для выделения дефектов под ди-	.
станционирующими решетками	544

УДК 620 МОНИТОРИНГ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620 CONDITION BASED MONITORING OF COMPLEX OBJECTS V. L. VENGRINOVICH

Аннотация

Исследованы проблемы анализа больших данных и оценки состояния конструкций в задаче мониторинга технического состояния сложных технических сооружений с помощью многосенсорных систем, измеряющих текущие параметры объекта. Задача сводится к идентификации (восстановлению) свойств объекта по измеряемым его характеристикам. Взаимосвязь временных свойств объекта и системы мониторинга определяется на этапе предварительного моделирования, для чего используются все алгоритмы моделирования от Метода Монте-Карло до RBF (радиальные базисные функции). Сущность обратной задачи идентификации рассмотрена на примере восстановления напряжений в любой точке металлической оболочки, на которой расположено разреженное множество датчиков напряжений. Для оценки данных мониторинга предложен фрактальный метод, который позволяет на каждой стадии мониторинга работать с квадратными матрицами, все характеристики которых легко вычисляются. Выделены статистически значимые параметры фракталов, обладающие необходимыми чувствительностями к малым изменениям параметров объекта.

Ключевые слова:

мониторинг по состоянию, многосенсорные системы, идентификация свойств.

Abstract

Big data analysis problems are investigated having the goal to estimate current condition of a complex structure with the help of multi- sensor system by measuring current parameters of an object. The task is reduced to identification (reconstruction) of critical object parameters controlling object safety. Interdependence of a object parameters and monitoring system are determined on the stage of modeling, any modeling algorithms, from Monte-Carlo to RBF (Radial Basic Functions) are available for this. The principle of solving the inverse identification problem Is considered using the example for stress values reconstruction in any point of metallic hull, using stress data from sparsely located stress measuring sensors. To estimate object properties from monitoring data the fractal approach is proposed, giving start to use at any monitoring stage to use square matrixes, which characteristics are easily calculated/ The statistically meaningful fractal parameters are separated, which have maximum sensitivity to small changes in object's parameters.

Key words:

condition monitoring, multi-sensors systems, properties identification.

Достижения последних лет в области неразрушающего контроля, сенсорики, обработки данных, передачи информации, информатики позволяют перейти к следующим этапам безопасной эксплуатации сложных технических объектов (СТО): мониторингу технического состояния (МТС) и прогнозированию остаточного ресурса (ПОР). К СТО можно отнести здания и сооружения, средства передвижении (летательные аппараты, суда, автомобили), мосты, электростанции и пр. Эти направления (МТС и ПОР), следовательно, находятся на стыке упомянутых прикладных ресурсов. Основой работы МТС и ПОР служат периодически считываемые показания датчиков, установленных на СТО, их математическая обработка и принятие решения о дальнейшей эксплуатации объекта. Эти задачи в комплексе определяют функциональное назначение системы МТС.

Для примера рассмотрим СТО в виде крупного строительного сооружения (например, высотного здания), для которого необходимо знание его технического состояния в любой момент времени. Здание оснащено установленной на нем системе различных датчиков состояния: деформацийнапряжений, углов наклона, ускорений отдельных узлов здания, базовых расстояний на объекте, датчиков скорости и направления ветра, положения опорных свай и пр. Данные поступают непрерывно, как правило в матричном виде, в обрабатывающий компьютер. Из-за их большого объема из этих данных выделяются их характерные признаки (ХПД), которые сравниваются с некоторыми характерными признаками объекта (ХПО), на основе заранее установленных алгоритмов принимаются решения о дальнейшей эксплуатации. На этом пути надо преодолеть много неопределенностей, задача не относится к классу детерминированных, и в конечном итоге состояние объекта может быть оценено с некоторой вероятностью. Кроме того задачи выбора номенклатуры и количества датчиков, а также характерных признаков данных и признаков состояния объекта относятся к статистическим задачам оптимизации. В действительности надо учесть еще разнообразие СТО, каждый из которых требует своего набора как датчиков, так и способов обработки данных. На рис. 1 показано схематически взаимодействие СТО и системы МТС. На этапе оценки состояния ТО производится сравнение признаков этих систем, причем даже процедура выбора признаков является во многом субъективной.



Рис. 1. Структура технического объекта (слева) и Система мониторинга этого объекта

Так на рис. 2 показан пример выходных данных 10-и сенсорной системы мониторинга, представленной в матричном виде.



Рис. 2. Матричное представление данных 10-и сенсорной системы мониторинга: сами данные; изменение 1-го собственного значения фракталов, выделенных на 1-м рис.; изменение 1-го собственного вектора значений вверху (сверху вниз)

Выделенные признаки системы мониторинга (СМ) выбираются из условия их значимых изменений при незначительных изменениях данных измерения, которые, в свою очередь, измеряются с определенной ошибкой. Процедура фильтрации сильно зависит от модели процесса, которая для СМ наиболее близко соответствует марковской цепи.

Назначению признаков СТО предшествует большая работа по исследованию СТО. Вот несколько примеров уже изученных систем: повреждения обмоток статоров двигателей – электрический дисбаланс; устойчивость высотных сооружений - частота их собственных колебаний; большие подшипники – гранулометрический состав масла в подшипнике; коррозионные повреждения под изоляцией - спектр электрического высокочастотного импеданса; напряженное состояние металлических башен - величина магнитных параметров вблизи специальных отверстий в башне; целостность турбинных лопаток – изображение картинок промышленной рентгеновской томографии; дефекты в трубопроводах – разность сигналов высокочастотных направленных акустических волн; целостность роторов больших электрических машин – разность сигналов акселерометров, внедренных в ротор; целостность мостов балочного типа – эксцентриситет несущей балки моста; функциональность газовой турбины – состав газов на выхлопе. Приведенный список дает представление о многообразии типов повреждений и способов их выявления физическими параметрами. В качестве детектирующих параметров могут также быть набор локальных деформаций, коэффициенты корреляций соседних датчиков деформаций, изменение характерных размеров и многое другое. Иногда применение методов выявления дефектов требует остановки объекта, например, методы рентгеновской томографии, хотя и в этом направлении наметился прогресс, в частности, томография процессов.

С методами оценки функциональности объекта тесно связаны номенклатура и число устанавливаемых на объект датчиков. Наиболее широкое применение получили датчики деформаций-напряжений (магнитные, оптоволоконные, тензометрические, электрические), индикаторы трещин (вихретоковые, капиллярные, магнитные), инклинометры, акселерометры, виброметры, инфракрасные термографы, газоанализаторы. Как правило, сигналы датчиков, включенных в СМ, подвергаются мощной математической обработке, чтобы выделить из них характерные признаки объекта: нарушение целостности, дисбаланс, расстояние до механического резонанса, коррозионные и усталостные повреждения, зоны концентрации напряжений, частоты собственных колебаний и пр.

Сегодня уже как минимум три инженерных сообщества поставили МТС во главу своей работы в области технического диагностирования. Вопервых – это Structural Health Monitoring (SHM) сообщество, которое будет проводить уже 9-ю международную конференцию по SHM и ряд других событий, например 18ю SPIE Conference on Smart Structures and Nondestructive Evaluation в США. В США также создано научно-техническое общество PHM (Prognosis and Health Management), научным ресурсом которого также являются мониторинг технического состояния и неразрушающий контроль. Наконец, в 2017 г. создано международное Общество СМ (мониторинг по техническому состоянию), первый Всемирный конгресс которого был проведен в июне 2017 г. в Лондоне. Наблюдается растущий интерес специалистов к переходу от контроля единичных дефектов к оценке непосредственно состояния больших технических систем. Наиболее наукоемкая часть этого направления состоит в обработке больших данных на выходе систем МТС и установление их корреляции с признаками деградации объекта.

В процессе эксплуатации в элементах СТО протекают физикохимические процессы (старение, ползучесть, возникновение зон концентрации напряжений (ЗКН), трещин, диффузионные процессы, изменение структуры материала, коррозия, износ, усталость, старение из-за воздействия температуры или химических реакций и т. п. Эти изменения в конструкции являются медленными и необратимыми. Они определенным образом зависят от времени. Их часто называют квазидетерминированными или полуслучайными. Они поддаются моделированию, наиболее распространенной формой модели принята модель вида:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{j=0}^{M} a_{ij} \epsilon_j(t), i = \overline{0 \dots n} \quad , \tag{1}$$

где a_{ij} – случайные величины; $\epsilon_j(t)$ – непрерывные детерминированные функции времени.

В формуле (1) есть разложение случайного процесса по детерминированному базису. Базисом могут быть степенные, экспоненциальные или другие функции, близко описывающие протекающие в конструкции процессы. В большинстве практических ситуаций порядок модели не превышает 2.

Случайная обратимая составляющая обусловлена флуктуациями температуры, давления, влажности, силы ветра, или другой механической нагрузки, или даже радиации. Это обратимая составляющая, дестабилизирующая воздействие на конструкцию. С учетом всех воздействий случайный процесс дрейфа параметров СТО можно записать в виде:

$$y(t) = \tilde{y}(t) + F(t), \qquad (2)$$

где $\tilde{y}(t)$ – нестационарный необратимый процесс с большой постоянной времени; F(t) – стационарный случайный процесс обратимых изменений параметров под воздействием внешних условий, как правило, с малой постоянной времени.

Предполагается, что оба процесса статистически независимы, имеющие автокорреляционные функции разного порядка. Необратимая составляющая может иметь как монотонный, так и импульсный характер, например, монотонный процесс коррозии и скачкообразное возникновение трещин соответственно.

Процесс необратимых изменений близок к марковскому процессу, так как логично предположить, что вероятность перехода в новое состояние зависит от самого состояния и не зависит от предыдущих переходных вероятностей (процесс без последействия). Это допущение дает хорошую базу для моделирования необратимого процесса. Значительно облегчается возможность применения для моделирования таких методов, как RBF-метамоделирование, метода Монте-Карло, методов анализа надежности различных порядков и способов анализа причинно-следственных связей, например регрессионного. Методы нелинейного метамоделирования результатов численных экспериментов обеспечивают непрерывное представление результатов моделирования, оценку точности и быструю интерполяцию больших объемов данных.

В БСО вектор, описывающий состояние опасности $A_r = \{A_k^r\}$, где r – индекс состояния системы, которое может появиться под влиянием извне или изнутри; k – номер элемента системы. Система МТС отображает состояние опасности текущим набором показаний группы датчиков $B_q = \{B_i^q\}$, где q – индекс результата измерения данным датчиком; i – номер датчика. Цель обратной задачи заключается в минимизации условной вероятности идентификации состояния риска A_r по B_q состояниям измеренных данных, ($P(A_r \mid B_q)$), что является типичной байесовской проблемой [1]:

$$P(A_r|B_q) = \frac{P(B_q|A_r)P(A_r)}{P(B_q)} , \qquad (3)$$

где $P(B_q | A_r)$ – условная вероятность получения определенного набора данных измерения при наличии состояния риска повреждения; $P(A_r)$ –

априорная вероятность риска повреждения; $P(B_q)$ – некая глобальная вероятность получения данных измерения.

Целью обратной задачи является максимизация условной вероятности идентификации состояния риска A_r по данным измерения B_q , что не противоречит условию минимизации ее отрицательного значение $(\min - P(A_r \mid B_q))$, что является типичной Баесовской задачей минимизации [2]:

min:
$$-\log P(A_r|B_q) = -\log P(B_q|A_r) - \alpha \log P(A_r) : \{A_r \in \mathbb{R}^k\},$$
 (4)

где *а* – коэффициент регуляризации.

В случае функциональной корреляции между данными измерений и искомым уровнем риска при Гауссовском распределении ошибки измерений, первый член правой части уравнения (2) можно рассматривать в качестве нормы измеряемых и искомых данных, соответственно, так что решение (2) может быть представлено следующим уравнением:

$$\tilde{A}_{r} = \arg\min\left\{\left\|B_{q}^{meas} - B_{q}^{calc}\right\| + \alpha\log P(A_{r})\right\} : \left\{A_{r} \in \mathbb{R}^{k}\right\},\tag{5}$$

где индексы *meas u calc* означают соответственно измеренные данные и данные, полученные на основании расчета в соответствии с моделью взаимодействия СМС и БСО.

В соответствии с уравнением (5), B_q^{meas} является вектором измеренных значений, B_q^{calc} вектором расчетных модельных данных. Априорная вероятность $P(A_r)$ может быть выражена в виде функционала, поддерживающего, например, гладкость, положительность, тотальную вариацию и другую качественную информацию о возможных рисках повреждения. Например, если производится поиск критических напряжений в конструкции, то моделирование распределения напряжений может быть выполнено в рамках теории упругости. Описанный способ минимизации в принципе возможен, но требует огромных вычислительных затрат и не пригоден для предсказания повреждений в сложных объектах в режиме реального времени.

В то же время из приведенного анализа следуют необходимости:

а) ситуационного моделирования взаимодействия моделей СТО и МТС;

б) повышение точности измерений;

в) определение нулевого состояния начала минимизации.

Последнее означает, что стабильность минимизации легче обеспечивается, когда начинается с какого-то ранее прогнозируемого уровня. Также необходимость предварительной оценки априорной вероятности состояния опасности и значение коэффициента регуляризации следуют из рассмотрения члена $\alpha \log P(A_r)$.

Другими словами, в целом необходимо увеличить вероятность измеренных данных с некоторой качественной штрафной функцией на поведение переходной функции распределения плотности вероятности, обеспечивающей, например, гладкость, положительность, тотальную вариацию, и т. п., что является типичной Баесовской задачей минимизации [1, 2]. Это уравнение дает только общую характеристику взаимодействия СМС и БСО. По сути это уравнение устанавливает лишь роль моделирования и априорной информации для прогнозирования отказов и повреждений в объекте по данным измерения ограниченным набором сенсоров.

Так как размерность вектора $B_q = \{B_i^q\}$ слишком велика по сравнению с размерностью вектора $A_r = \{A_k^r\}$, восстановить картину повреждений объекта по данным матрицы измерений очень сложно. Эта ситуация похожа на ту, которую Donoho [3] назвал "проклятием" больших данных. Преодоление этого ограничения возможно на пути уменьшения размерности исходных данных, иными словами, путем перехода к выделению некоторых признаков данных, или атрибутов, ассоциированных с векторами $A_r = \{A_k^r\}$. Пусть $X_J (J = 1, 2, ..., J)$ будет ограниченный набор признаков (статистических переменных объекта), извлеченных из измеренных данных и определяющих его новый образ объекта. Чтобы предсказать ожидаемое будущее объекта, связанное с данными измерений $B_a = \{B_i^q\}$, необходимо определить функцию $A_r = F(X_i)$, используя соответствующие инструменты моделирования. Данная формулировка модели означает переход от *j*-пространства новых скрытых переменных, соответствующих измеренным данным к *k*-мерному пространству сценарий опасных состояний объекта.

Много важных особенностей множества данных измерения может быть учтено в матричном формате UxW массива: $X_{j,m}$; 1 < j < U, 1 < m < W, где ряды – математически выраженные атрибуты объекта, а колонки – субъекты одного признака. Новый подход включает в себя использование истории мониторинга (архив) для предсказания приблизительной численной модели объекта. Также могут быть использованы следующие известные алгоритмы.

1. Линейный и нелинейный регрессионные анализ $a_m = \sum b_k (1 - d_{k,m}) + \eta_m$.

2. Методы главного и независимого компонентных анализов, РСА и ICA соответственно, в качестве способов снижения размерности и реализации корреляционного анализа матрицы.

3. Метод быстро рассчитываемых метамоделей с помощью радиальных базисных функций: $f(A) = \sum_{i=1}^{N} q_i \phi((X - X_i))$, который зависит только от евклидова расстояния между двумя переменными.

Вопрос поиска значимых параметров изменяющейся во времени матрицы результатов измерений также представляет значительные трудности. Разработан так называемый фрактальный метод, который позволяет использовать численные стохастические методы анализа одинаковых матриц во времени. Сущность его представлена на рис. 3. Для описания второго метода обработки больших данных представим выходные данные в системе СМС в виде прямоугольной матрицы $B_q = \{B_i^q\}$, в которой в каждой из колонок присутствует вектор B_i^Q , а в каждом из рядов – вектор B_i^q , где I – число сенсоров, а *Q* – число одновременных измерений всеми сенсорами, причем, по определению

$$B_{1}^{1} \quad \dots \quad B_{I}^{Q}$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$B_{q} = \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$B_{I}^{1} \quad \dots \quad B_{I}^{Q}$$

$$(6)$$

Во многих СМС к матрице (6) для оценки риска и степени опасности применяется так называемый пороговый анализ, причем, опасность идентифицируется, когда показания одного из сенсоров превышают некоторое предельное значение, например, напряжения, угол наклона, расстояние и др., заданные разработчиком проекта объекта. В то же время, во многих СМС, в процессе мониторинга изменения в элементах матрицы (6), даже в состоянии приближающегося отказа *A*, любого из элементов, свободного от сенсоров, обычно намного ниже, чем предельные значения. Таким образом, они остаются «незамеченными» при автоматическом пороговом наблюдении за данными мониторинга.

Для пояснения рассмотрим произвольно нагруженную оболочку (рис. 3), разбитую на ячейки, причем, наблюдение за распределением напряжений в ячейках проводится датчиками в ограниченном числе ячеек (заштрихованы). Распределение напряжений в ячейках достаточно сложное и может быть рассчитано с помощью известных инженерных инструментов в рамках теории упругости. Ясно, что в общем случае в ячейках, в которых сенсоры отсутствуют, невозможно идентифицировать наступление опасных ситуаций с помощью порогового метода по данным рассредоточенной сети сенсоров в заштрихованных ячейках.

Заметим, что в нашем примере значения в рядах матрицы (4) – это результаты (нормализованные) последовательных измерений i-ым сенсором, а значения в колонках – результаты измерений соответствующим сенсором в q-ый момент времени.



Рис. 3. Схема нагруженной оболочки, разбитой на ячейки. Датчики напряжений расположены в заштрихованных ячейках. По данным измерений в них подлежат определению напряжения в светлых ячейках

Пусть член B_i^q – значение напряжения в заштрихованной ячейке. Вопрос: имея в распоряжении матрицу B_i^q , что выбрать в качестве признака (атрибута) риска (под риском здесь понимается, например, величина напряжения, близкая к пределу текучести) в любой точке оболочки, включая ячейки, не содержащие сенсоров? Ответ не так прост и не может быть дан только посредством решения обратной задачи теории упругости по результатам ограниченных в пространстве данных измерения. Например, ясно, что единичные выбросы сигналов отдельными датчиками не обязательно означают возникновение опасной ситуации в конструкции, а могут быть просто сбоем в электронной системе. Поэтому прежде необходимо определить атрибуты состояния опасности оболочки. Последние могут включать в себя показания также группы сенсоров. Определение атрибутов может быть сделано на этапе моделирования опасных ситуаций. В процессе моделирования для вычисления переходных вероятностей, $\{P(A_r|B_q)\}$, вводится понятие атрибута опасного состояния, X_i . В общем случае в качестве инструментов для установления статистического соответствия $(A_r|X_i|B_q)$ могут быть использованы: регрессия, классификация, анализ главных компонент (PCA), анализ независимых компонент (ICA), кластеризация (облака), конструирование метамоделей и др. [3]. Общим свойством всех этих инструментов является обработка всех матричных данных целиком. Рассмотрение полной матрицы за продолжительный период времени – это и преимущество и недостаток одновременно, причем, недостаток состоит в игнорировании локальных свойств прямоугольной $(I \neq Q)$ матрицы при последовательном ее заполнении со временем, что требует непрерывного сопоставления текущих и предшествующих данных и оперирования каждый раз с очень большими объемами данных. При этом также не используется возможность извлечения многих дополнительных признаков, которые могут быть получены при оперировании квадратными матрицами. Использование последних предусмотрено алгоритмом, предлагаемым ниже.

Для этого выделим в матрице (4) первые $Q_a = I$ колонок. Получим kQ_a квадратную матрицу. Обратимся к статистическим атрибутам подобных kQ_a матриц, получаемых путем одношагового сдвига исходной квадратной матрицы по мере заполнения прямоугольной матрицы в процессе измерений при мониторинге. Назовем такую смещающуюся матрицу «движущимся фракталом». Общее число возможных сдвигов для получения набора квадратных матриц составляет 2(Q-I+1). Можно было бы продолжать дробить квадратные матрицы на меньшие составляющие с целью вычисления ее фрактальных характеристик, однако ограничимся пока свойствами матриц размерности kQ_a . Для этого рассчитаем ее первые собственные значения E_j , и первые значения собственных векторов V_j , соот-

18

ветственно. На выходе процесса мониторинга таким способом образуется двухрядная матрица $X_{j,2}(t)$, которая сопоставляется с предварительно генерированной на этапе моделирования матрицей $\widetilde{X}_{j,2}(t)$ для оценки состояния риска. Другие статистические атрибуты состояния объекта мониторинга, полученные с помощью традиционных методов обработки PCA, ICA, и др. также могут быть использованы для статистического описания характеристик квадратной матрицы.

Рис. 2 иллюстрируют применение описанного выше анализа. В двух кластерах значения показаний в среднем соответственно на 10 % выше и ниже среднего по матрице. От пороговых значений величины в матрицах еще далеко, а имеющиеся отклонения могут быть связаны с небольшими изменениями значений искомого параметра (например, напряжений), в близлежащих ячейках. Исходная матрица 10х280 заполнялась случайными числами в диапазоне 110÷130. В 1 и 3 рядах случайные числа в среднем на 10 % превышали средние по матрице, начиная с 30-ой до 100-ой колонок, а в рядах 7 и 9 были ниже средних на 10 % в диапазоне колонок 70-130. Сверху показана матрица в виде точечной диаграммы, а снизу – в цифровом виде. Изображенные на рис. 2 выбросы значений матрицы показаны без привязки к их плотности, происхождению, коэффициенту корреляции, и, в конечном итоге, они не могут идентифицировать наличие "дефекта", чтобы оценить вероятность перехода объекта в состояние "повреждения" или отказа. Часто этот недостаток является критическим, например, при необходимости принятия срочного решения, пока объект еще эксплуатируется. Задача распознавания "дефекта" становится еще более проблематичной при оценке ситуации по среднему значению фрактала. Видно, что изменения средних значений находятся в пределах колебаний шума и не дают возможности адекватно идентифицировать дефектные зоны. Мы реализовали также РСА анализ этих данных в рамках большой прямоугольной матрицы и в рамках "движущегося фрактала". Последний дает возможность идентифицировать дефектную зону с помощью наблюдения за динамикой изменения первых собственных значений и первых значений векторов фракталов (в нормализованном виде), а также оценкой корреляционных матриц. Из-за большого объема выходных данных мы не иллюстрируем тот факт, что традиционный РСА полной прямоугольной матрицы не может быть задействован для системы мониторинга, тогда как на выходе РСА в рамках концепции фракталов получаем ограниченное число статистических атрибутов для добавления к образу объекта.

Наибольшую информацию представляет динамика поведения первых элементов собственных векторов, показанная на рис. 5. Желтая кривая чет-ко идентифицирует дефектные зоны на фоне бездефектной области. Величина превышения выражает степень дефектности. Недостатком оценки образа дефектности объекта собственных значений векторов является игнорирование знака отклонений, но он легко компенсируется путем дополни-

тельных анализа полной матрицы значений, как на рис. 5, или первых собственных значений (не показаны). Путем добавления ограниченного числа статистических атрибутов, полученных из анализа "движущихся фракталов" данных мониторинга возможно формирование сколь угодно сложного образа объекта.



Рис. 5. Первые значения собственных векторов: "дефектная" матрица – желтый цвет; исходная матрица – синий цвет

Одним из параметров, описывающим поведение системы в нашем случае, может быть сумма модулей действительных значений компонент первого собственного вектора фрактала. Этот параметр неплохо описывает поведение средних, вокруг которых «меняются» переменные (рис. 6).



Рис. 6. Сумма модулей действительных значений компонент первого собственного вектора фрактала

Для примера на рис. 7 показано изменение параметра «средние значения фракталов». Из этого графика видно, что данный параметр не представляет интереса в качестве значащего, т. к. он не реагирует на значимые изменения показаний во фракталах.



Рис. 7. Средние значения показаний в столбцах: "дефектная" матрица – желтый цвет; исходная матрица – синий цвет

Весьма информативным может служить РСА анализ фракталов, в частности, корреляционная матрица Пирсона (КМП), которая табулирует коэффициенты корреляции данных отдельных пар (или большего количества) датчиков. Понятно, что, если между показаниями близко лежащих датчиков коэффициенты корреляции (КК) близки к 1, т. е. опасность того, что конструкция в целом реагирует на опасные воздействия (например, снежный покров на крыше), в отличие от ситуации, когда КК соседних пар показаний не коррелируют. В табл. 1 показана парная КМП различных пар датчиков, построенная по реальным данным показаний 8-и датчиков деформации на одном из уровней несущего кольца кровли комплекса «Минск-Арена».

Variables	А	В	С	D	E	F	G	Н
А	1	0,709	0,674	0,763	<mark>0,987</mark>	<mark>0,954</mark>	0,564	0,747
В	0,709	1	0,235	0,286	0,765	0,836	0,273	0,220
С	0,674	0,235	1	<mark>0,971</mark>	0,645	0,596	<mark>0,946</mark>	0,971
D	0,763	0,286	<mark>0,971</mark>	1	0,732	0,659	0,880	<mark>0,992</mark>
Е	<mark>0,987</mark>	0,765	0,645	0,732	1	<mark>0,964</mark>	0,541	0,709
F	<mark>0,954</mark>	0,836	0,596	0,659	<mark>0,964</mark>	1	0,541	0,633
G	0,564	0,273	<mark>0,946</mark>	0,880	0,541	0,541	1	0,862
Н	0,747	0,220	<mark>0,971</mark>	<mark>0,992</mark>	0,709	0,633	0,862	1

Табл. 1. Correlation matrix (Pearson)

Желтым цветом выделены КК, превышающие значения 0,9. Если принять за критерий опасности КК соседних датчиков, из обозначенных желтым пар опасность представляют высокие КК датчиков С-D и F-E. Следует сказать, что для установления значимости этого критерия требуется провести большую работу по ситуационному моделированию опасных ситуаций кольца, которые могут привести к последовательному обрушению конструкции.

Заключения

1. Изучена способность автоматической СМС конструкций предсказывать наступление в последней стадии повреждения или отказа по данным многосенсорных измерений, представленных в матричном виде.

2. Предлагается метод автоматического слежения за изменением матричных данных, возникающих на выходе много сенсорной системы, широко используемой для мониторинга состояний таких объектов, как высотные здания, мосты, электростанции и т. п.

3. Идентификация дефектных зон ограниченным набором атрибутов объекта реализуется путем автоматического выделения статистических параметров фракталов, представляющих из себя квадратные матрицы размером в число рядов исходной прямоугольной матрицы, перемещающиеся дискретно в процессе мониторинга. Предлагаемый метод анализа больших матричных данных на выходе автоматических СМС, названный методом «движущегося фрактала», демонстрирует более эффективную способность распознавания дефектных областей в объекте, подвергающемся мониторингу, чем простейший пороговый метод, или другие статистические методы, оперирующие полным набором измеренных данных.

4. При дальнейшем развитии этого метода предстоит оценка количественного соответствия между типом и степенью дефектности, с одной стороны, и атрибутами объектов, полученными с помощью статистического анализа "движущихся фракталов", с другой. Ясно, что допустимые величины статистических атрибутов должны оцениваться на этапе проектирования и ситуационного моделирования поведения объекта, принимая во внимание допустимость всех прямых и косвенных последствий после небольших повреждений в конструкции. Наша первая практика показывает, что новая техника также дает возможность детектирования скрытых дефектов на ранних стадиях повреждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Donoho, D.** High-Dimensional Data Analysis: The Blessings and Curses of Dimensionality. Mathematical Challenges of the 21st Century, Stanford University, http://www-stat.stanford.edu/_donoho, 52.

2. **Skilling, J.** Probabilistic data analysis: an introductory guide / J. Skilling // Journal of Microscopy. – 1998. – Vol. 190, Pts.1/2. – P. 28–36.

3. Vengrinovich, V. L. Bayesian Image and Pattern Reconstruction from Incomplete and Noisy Data / V. L. Vengrinovich // Tutorial. Int.J., "Pattern Recognition and Image Analysis". – 2012. – Vol. 22, No. 1. – P. 99–107.

УДК 620.179.14 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОБИЛЬНЫХ МНОГОЦЕЛЕВЫХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

В. Н. КОСТИН, Я. Г. СМОРОДИНСКИЙ

ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН» Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

THE DEVELOPMENT PERSPECTIVES OF THE MOBILEMULTIFUNCTIONALHARDWARE/SOFTWARESYSTMESOF ELECROMAGNETIC TESTINGV. N. KOSTIN, YA. G. SMORODINSKIIV. N. KOSTIN, YA. G. SMORODINSKII

Аннотация

Показана неустойчивость результатов пассивного магнитного контроля к воздействию неконтролируемых неоднородных полей. Показано, что совместное использование нескольких параметров контроля для оценки одного объекта может быть обусловлено как нелинейностью взаимосвязей контролируемых параметров с измеряемыми параметрами контроля, так и необходимостью учета условий измерений. Сформулированы основные критерии, которым должны отвечать перспективные многоцелевые системы активного электромагнитного контроля.

Ключевые слова:

электромагнитный контроль, нормальная компонента поля, пассивный контроль, активный контроль, аппаратно-программная система.

Abstract

The instability of the passive electromagnetic testing results in the impact of uncontrollable inhomogeneous fields has been shown. It has been shown that the sharing of several testing parameters for state estimation of an object can be conditioned by both the non-linearity of the relation of tested parameters with measured testing parameters and the requirement of the consideration of measurement conditions. The basic criteria to be met by perspective multifunctional systems of an active electromagnetic testing have been formulated.

Key words:

electromagnetic testing, normal component of field, passive testing, active testing, hardware/software system.

Неразрушающий контроль (НК) и техническая диагностика (ТД) становятся неотъемлемыми элементами современной промышленности. Наиболее востребован неразрушающий контроль в таких отраслях, как космическое и авиастроение, железнодорожный транспорт, машиностроение, автомобилестроение, нефтегазовая промышленность, предприятия военно-промышленного комплекса. Необходимость технической диагностики обусловлена повышением нагрузок на механизмы и сооружения, а также деградацией материалов под действием таких факторов, как коррозия, локальные пластические деформации, постоянные и переменные упругие деформации, изменения температурного режима.

Количество и уровень современных исследований и разработок доказывают актуальность и значимость магнитного и вихретокового видов контроля, объединяемых понятием электромагнитный контроль. Практически во всех работах предполагается воздействие на объект контроля постоянным или переменным магнитным полем, т.е. эти методы относятся к активным методам контроля и диагностики. Однако, к настоящему времени в некоторых изданиях появились публикации по магнитным методам дефектоскопии и структуроскопии в так называемых «геомагнитных полях». Эти методы не предполагают специального воздействия на контролируемые объекты постоянным или переменным магнитным полем. Процесс контроля заключается в регистрации и анализе неоднородностей намагничивания, возникающих в процессе жизненного цикла объектов контроля. При этом авторы таких пассивных методов не принимают во внимание практически повсеместное существование магнитных полей природного и техногенного происхождения, величина которых может многократно превосходить поле Земли (см., например, [1]). Очевидно, что за время жизненного цикла ферромагнетики могут подвергаться воздействию самых различных полей и их магнитная предыстория, как правило, неизвестна.

Легко показать, что предлагаемый в так называемом «методе магнитной памяти металлов» диагностический признак зон концентрации напряжений, а именно переход нормальной компоненты магнитного поля через ноль [2], формируется независимо от структурно-фазового или напряженно-деформированного состояния ферромагнетика. На рис. 1 приведены рассчитанные с помощью свободно распространяемой программы FEMM (http://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php) силовые линии магнитного поля и распределения нормальной компоненты магнитного поля по длине цилиндрического стержня из стали 10 с начальной магнитной проницаемостью $\mu_n = 120$, длиной (length) 30 см и диаметром 1 см. Источником магнитного поля был соленоид длиной 100 см и диаметром внутреннего отверстия 5 см. Поле в центре соленоида было выбрано равным 1,2 А/м, т. е. было много меньше земного.



Рис. 1. Силовые линии магнитного поля и распределения нормальной компоненты магнитного поля по длине цилиндрического стержня из стали 10 ($\mu_n = 120$) при его различных положениях относительно источника слабого магнитного поля: а – в центре соленоида; б – 25 см стержня за пределами соленоида

Из рис. 1, а видно, что при расположении цилиндра в центре соленоида нормальная компонента поля на поверхности цилиндра имеет экстремумы разного знака вблизи торцов цилиндра и проходит через ноль в середине цилиндра. Как видно из рис. 1, б перемещение цилиндра к торцу соленоида, т. е. в область неоднородного магнитного поля, приводит к изменению характера распределения нормальной компоненты поля H_n вдоль цилиндра и к смещению места перехода этой компоненты через ноль. Соответственно изменяется и градиент нормальной компоненты поля вдоль оси цилиндра. При этом очевидно, что перемещение относительно источслабого магнитного поля не ника может изменить напряженнодеформированное состояние намагничиваемого объекта (т. е. расстояние между атомами, плотность дислокаций и т. д.). Распределение нормальной компоненты поля вдоль намагничиваемых объектов, первую очередь, обусловлено их формой и размерами, причем это распределение легко может быть изменено неоднородным магнитным полем. Таким образом, пассивный контроль по устойчивости к внешним магнитным полям, а значит и по повторяемости и достоверности результатов явно уступает активным (с контролируемым намагничиванием) методам магнитной структуроскопии и дефектоскопии.

Необходимость измерения двух и более параметров для достоверного магнитного контроля структурно-фазового состояния ферромагнитных сталей и сплавов обусловлена двумя основными причинами:

1) методическая, когда для полной оценки состояния объекта требуется определение нескольких его магнитных параметров;

2) измерительная, когда для достоверного измерения необходимого параметра контроля требуется измерение двух и более магнитных величин, характеризующих как объект контроля, так и условия измерений.

Методическая многопараметровость

Одним из первых примеров двухпараметрового магнитного контроля явился контроль качества закалки подшипниковых сталей. В этом случае необходимость измерения второго параметра контроля была обусловлена неоднозначной зависимостью коэрцитивной силы H_c от температуры закалки сталей с высоким содержанием углерода. В качестве второго параметра использовалась относительная величина намагниченности насыщения, которая дифференциальным способом измерялась приборами типа ДМС. В работе [3], например, показано, что для магнитной твердометрии закаленных и отпущенных углеродистых сталей во всем диапазоне изменения твердости необходимо использовать два параметра: коэрцитивную силу H_c и намагниченность коэрцитивного возврата M_{Hc} .

Измерительная многопараметровость

В работе [4] для случая однородного намагничивания образцов конечных размеров было получено следующее выражение:

$$M_{r} = -\frac{H_{e}^{*}}{H_{i}^{*}}M_{r}^{t} , \qquad (1)$$

где H_e^* – значение внешнего магнитного поля, соответствующее остаточной намагниченности вещества, т. е. нулевому внутреннему полю; H_i^* – значение внутреннего магнитного поля, соответствующее остаточной намагниченности тела, т. е. нулевому внешнему полю.

Как следует из (1), даже при однородном намагничивании определение остаточной намагниченности вещества образцов конечных размеров требует измерения трех магнитных величин. При локальном, неоднородном намагничивании с помощью приставных преобразователей результаты магнитных измерений дополнительно будут зависеть от формы поверхности и однородности намагничивания зоны контроля, наличия и величины зазоров в составных магнитных цепях и ряда других факторов. Это требует принятия специальных мер для стабилизации условий измерений и (или) для уменьшения влияния мешающих факторов. В работах [4, 5] показано, что учет дополнительных магнитных параметров, характеризующих составную цепь приставной преобразователь – объект, позволяет значительно снизить влияние таких мешающих факторов, как неконтролируемый зазор между преобразователем и объектом, а также вариация формы и размеров контролируемых объектов.

Вихретоковый контроль (ВТК) является многопараметровым по своей сути, поскольку на сигнал вихретокового преобразователя оказывает влияние сразу много факторов (удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость материала объекта контроля, взаимное расположение ВТП и объекта, температура и т. д.). Присущая ВТК многопараметровость позволяет получить информацию сразу о нескольких функциональных характеристиках контролируемых объектов (например, электропроводность и толщина листа). Однако при этом необходимы специальные алгоритмы выделения информации о каждой контролируемой характеристике.

Таким образом, многопараметровый подход в электромагнитном контроле позволяет расширить круг контролируемых материалов и объектов, скомпенсировать влияние мешающих факторов, повысить достоверность и информативность контроля.

Анализ современных тенденций развития средств электромагнитного контроля позволяет сделать вывод о том, что перспективным направлением является создание и применение многоцелевых аппаратнопрограммных систем электромагнитного контроля и диагностики (МАПС ЭМК) с большой степенью унификации их аппаратной части. Схема получения и обработки информации в таких МАПС ЭМК показана на рис. 2. Фоном выделена единая аппаратная часть управления измерениями и обработки измерительной информации.



Рис. 2. Общая схема получения и обработки информации в многоцелевых аппаратно-программных системах электромагнитного контроля с одним или N параллельными источниками поля

Можно выделить ряд основных характеристик, которыми должны обладать перспективные МАПС ЭМК.

1. Активный контроль. Управляемое воздействие на объект контроля квазистатическим или переменным магнитным полем позволяет устранить влияние неизвестной магнитной предыстории, увеличить отношение сигнал/шум. Заданный алгоритм перемагничивания позволяет измерять несколько необходимых параметров контроля (максимальную индукцию, остаточную индукцию, коэрцитивную силу, и т.д. – при магнитном контроле; амплитуду и фазу сигнала, гармонический состав – при вихретоковом контроле).

2. Многопараметровость. Измерение нескольких параметров контроля может обеспечить расширение круга контролируемых объектов, определение нескольких контролируемых (функциональных) характеристик объектов, полностью или частично скомпенсировать влияние мешающих параметров.

3. Многоканальная регистрация сигналов. При измерении любого магнитного параметра вещества определение соответствующих значений внутреннего поля и намагниченности (или индукции) требует наличия как минимум двух измерительных каналов. Использование многоэлементных вихретоковых преобразователей требует минимум N+1 канала (один канал – измерение возбуждающего тока, n – количество измерительных обмоток или датчиков).

4. Компьютерные технологии генерации электромагнитных полей и обработки измерительной информации (написание управляющих измерениями программ на языках высокого уровня; легкая адаптация алгоритмов контроля под различные объекты и условия контроля и т. д.).

5. *Мобильность*, т. е. питание как от сети переменного тока, так и от автономных источников питания; минимизация весогабаритных характеристик МАПС ЭМК; защита от неблагоприятных внешних факторов.

6. *Модульность*. Показанная на рис. 2 схема содержит: 1 – модуль измерительных преобразователей; 2 – модуль генерации и преобразования измеряемых сигналов; 3– компьютер. Модульный принцип построения позволяет легко менять характеристики МАПС ЭМК и даже виды реализуемого контроля (например, с магнитного на вихретоковый) путем смены измерительных преобразователей и запуска соответствующей управляющей программы.

7. Приемлемая для широкого круга пользователей стоимость.

Очевидно, что данный перечень требований может уточняться по мере развития средств электромагнитного контроля и диагностики.

Настоящая работа выполнена при поддержке проекта УрО РАН № 15-17-2-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Реутов, Ю. Я.** Магнитные поля, действующие на человека и другие биологические объекты в условиях современного города / Ю. Я. Реутов, А. А. Литвиненко // Экология. – 1987. – № 1. – С. 66–74.

2. Власов, В. Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В. Т. Власов, А. А. Дубов. – М. : ЗАО «Тиссо», 2004. – 424 с.

3. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / К. В. Костин // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 3–11.

4. Костин, В. Н. Локальное измерение индукции коэрцитивного возврата при наличии зазора в составной цепи "преобразователь-объект" / В. Н. Костин, О. Н. Василенко // Дефектоскопия. – 2012. – № 7. – С. 3–14.

5. Костин, В. Н. О некоторых новых возможностях локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов / В. Н. Костин, О. Н. Василенко // Дефектоскопия. – 2012. – № 7. – С. 15–25.

E-mail: kostin@imp.uran.ru

УДК 620.1.08 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ. ПРОБЛЕМЫ МЕТОДОВ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В. А. СЯСЬКО, С. С. ГОЛУБЕВ, Н. И. СМИРНОВА

ООО «Константа» «Росстандарт» ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева» Санкт-Петербург, Москва, Россия

UDC 620.1.08

PERSPECTIVE METHODS OF MEASURING PROTECTIVE COATINGS THICKNESS. PROBLEMS OF METHOD AND METROLOGICAL ASSURANCE V. A. SYASKO, S. S. GOLUBEV, N. I. SMIRNOVA

Аннотация

Рассмотрены перспективные бесконтактные методы неразрушающего контроля для задач измерения толщины покрытий, их основные характеристики, а также информативные и мешающие параметры при измерении толщины покрытий. Проанализирована нормативная база по метрологическому обеспечению методов измерения толщины покрытий. Сформулированы предложения по разработке нормативных документов на рассмотренные бесконтактные методы измерения толщины покрытий, которые будут устанавливать требования к толщиномерам, мерам толщины покрытий, а также требования к их поверке и калибровке. Указаны меры, позволяющие обеспечить единство измерений в рассматриваемой области.

Ключевые слова:

толщина, покрытие, меры толщины, бесконтактный, вихретоковый, термография, рентгеновский, измерение.

Abstract

The article is devoted to prospective non-destructive non-contact methods for coating thickness measurement, their main characteristics, informative parameters and factors affecting measurement accuracy. The normative base for metrological assurance of coatings thickness measurement methods is analyzed. The formulated suggestions on the development of normative documents for the considered non-contact methods for coating thickness measurement establish requirements for thickness gages, coating thickness standards and their verification and calibration. Indicated measures to ensure the uniformity of measurements in the area under consideration.

Key words:

thickness, coatings, coating thickness standards, non-contact, eddy-current, infrated thermography, x-ray, measurement. Как известно, покрытия – это слои, искусственно полученные на поверхности металлических или неметаллических изделий, предохраняющие их от коррозии, износа или придающие им заданные функциональные свойства: прочность, износостойкость, теплозащиту, радиопоглощение, антифрикционность и др. В зависимости от материала покрытия можно разделить на несколько основных групп: металлические, неметаллические, неорганические, лакокросочные, пластмассовые, композиционные, покрытия из специальных материалов.

Толщина *Т* покрытия нормируется для конкретных типов изделий и является одним из основных измеряемых параметров при неразрушающем контроле (НК) их качества.

В [1] указано, что для задач измерения *Т* можно сформулировать следующие сочетания покрытие/основание:

1) ферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих ферромагнитных основаниях;

2) неферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих ферромагнитных основаниях;

3) диэлектрические покрытия на электропроводящих ферромагнитных основаниях;

4) ферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих неферромагнитных основаниях;

5) неферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих неферромагнитных основаниях;

6) диэлектрические покрытия на электропроводящих неферромагнитных основаниях;

7) ферромагнитные электропроводящие покрытия на диэлектрических основаниях;

8) неферромагнитные электропроводящие покрытия на диэлектрических основаниях;

9) диэлектрические покрытия на диэлектрических основаниях.

Известна большая группа задач измерения толщины покрытий в условиях, производственных не допускающих или существенно ограничивающих возможность механического контакта первичных измерительных преобразователей с поверхностью изделий в процессе контроля. В связи с этим, в настоящее время получают все большее развитие методы, обеспечивающие бесконтактный режим измерения Т, как вихретоковый фазовый, активный термографический, такие рентгеновские (радиометрические) флуоресцентный и В – отражения метолы.

Дадим краткую характеристику данных методов НК применительно к указанным выше задачам измерения толщины.

Вихретоковый вид НК – основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте (объекте и покрытии) и зависящих от электрофизических и геометрических параметров основного металла и покрытия. В зависимости от задачи измерения и свойств материала основания и покрытия могут применяться различные функции изменения во времени электромагнитного поля (пробной энергии) и различные первичные информативные параметры, определяемые способом получения первичной информации. В практику бесконтактных измерений *T* прочно вошли вихретоковые толщиномеры, реализующие фазовый метод измерения, имеющий ряд преимуществ.

С использованием фазового метода вихретокового вида НК возможно бесконтактное проведение измерений *T*:

– электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях;

– электропроводящих ферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях;

– электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях.

На рис. 1. приведена структурная схема измерительного преобразователя, реализующего вихретоковый фазовый метод измерения толщины металлических покрытий на металлических основаниях [2].



Рис. 1. Структурная схема вихретокового измерительного преобразователя, реализующего фазовый метод измерения толщины металлических покрытий на металлическом основании

Главным достоинством вихретокового вида НК является возможность разработки преобразователей с частотой тока возбуждения от десятков Гц до десятков МГц для измерения толщины покрытий в диапазоне от единиц микрометров до десятков миллиметров с возможностью подавления влия-

ния зазора между преобразователем и покрытием, шероховатости покрытия и основания, а также радиуса основания. К недостаткам следует отнести зависимость показаний от ряда мешающих параметров: электропроводности σ и магнитной проницаемости μ оснований и покрытий. Также имеется ряд ограничений по возможным сочетаниям покрытие–основание.

Тепловой вид НК – основан на анализе параметров тепловых полей контролируемых объектов.

Активный синхронный термографический метод [3], обобщенная схема которого представлена на рис. 2, позволяет производить измерение *T*:

- диэлектрических покрытий на металлических основаниях;

– диэлектрических покрытий на диэлектрических основаниях.

Достоинством метода является возможность бесконтактных измерений в диапазоне толщин от нескольких микрометров до 1 мм. Недостатком является зависимость результатов измерения от теплофизических (коэффициент теплопроводности λ , теплопроводность *C*, плотность ρ , коэффициент температуропроводности $a = \lambda/\rho C$, тепловая инерция $e = \lambda (C\rho)^{1/2}$, отражающая способность покрытия) и геометрических (в основном, шероховатость *Rz*) параметров покрытия и основания, а также адгезии покрытия к основанию.



Рис. 2. Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего активный синхронный термодинамический метод измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических и неметаллических основаниях

Радиационный вид НК в основном использует фотонное (в том числе рентгеновское), нейтронное и электронное излучение. Рентгеновский флуоресцентный метод – радиометрический метод неразрушающего контроля, предназначенный для измерения *T* металлических тонких и сверхтонких покрытий на металлических и диэлектрических основаниях, особенно малоразмерных. Также применим для измерения многослойных покрытий. На рис. 3. представлена обобщенная схема измерительного преобразователя, реализующего рентгено-флюоресцентный метод измерения толщины покрытий.



Рис. 3. Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего рентгено-флюоресцентный метод измерения толщины покрытий

С использованием *радиометрического* β*-отражения метода*, обобщенная схема первичного преобразователя которого представлена на рис. 4, можно производить измерение *T*:

– диэлектрических покрытий на металлических и диэлектрических основаниях;

– металлических (в том числе многослойных) покрытий на металлических и диэлектрических основаниях.

Метод позволяет проводить измерения в диапазоне от сотых долей до сотен микрометров.



Рис. 4. Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего β-отражения метод измерения толщины покрытий

Мешающими параметрами для радиометрических методов являются: плотность ρ и атомный номер $N_{\rm at}$ материалов покрытия и основания, шероховатость Rz.

Все указанные выше бесконтактные методы измерения T защитных и функциональных покрытий рассмотренных видов НК являются косвенными методами. Это означает, что настройка (градуировка), поверка и калибровка средств измерения должны, в соответствии с [4], осуществляться по эталонным мерам толщины, имитирующим измеряемый физический параметр (в данном случае T) в диапазоне его изменения при известных стабильных мешающих параметрах. Также следует учитывать, что каждый отдельно взятый метод рассматриваемых видов НК решает ограниченный круг задач измерения T и характеризуется отличающимися мешающими параметрами.

Существующая Государственная поверочная схема для средств измерения (СИ) толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм, утвержден-

ная в качестве рекомендации по метрологии P50.2.006-2001 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне 1–20000 мкм» разработана ФГУП «ВНИИМС» взамен устаревшего ГОСТ 8.536-85. В качестве рабочих СИ применяют меры толщины и толщиномеры покрытий, сгруппированные по назначению в зависимости от вида материалов покрытий и оснований измеряемых объектов. На рис. 5. представлены девять типов толщиномеров из поверочной схемы.



Рис. 5. Рабочие средства измерений по поверочной схеме Р50.2.006-2001

Выше были сформулированы сочетания покрытие/основание, анализ которых показывает, что в действующей поверочной схеме нет следующих типов толщиномеров:

- диэлектрических покрытий на диэлектрических основаниях;

- ферромагнитных покрытий на диэлектрических основаниях.

В соответствии с действующей поверочной схемой [5], основным средством поверки толщиномеров покрытий являются эталонные меры толщины покрытий и установки для поверки магнитных и вихретоковых толщиномеров диэлектрических покрытий, пример которых представлен на рис. 6.

Меры толщины немагнитных токопроводящих покрытий на магнитных основаниях 4÷1000 мкм δ=(0,1+0,025#) мкм

Меры толщины немагнитных токопроводящих покрытий на немагнитных токопроводящих основаниях 2 ÷ 500 мкм े=(0,3+0,025*h*) мкм Меры толщины магнитных покрытий на немагнитных токопроводящих основаниях 5 ÷100 мкм δ=(0,1+0,025#) мкм

Рис. 6. Эталоны 2-го разряда по поверочной схеме Р50.2.006-2001
До 1988 г. на меры толщины действовал ГОСТ 25177-82. Продление срока действия ГОСТ 25177 невозможно, т.к. некоторые его положения устарели и не соответствуют современным требованиям. Вышеуказанные бесконтактные методы трех видов НК, используемые при разработке измерительных преобразователей толщиномеров защитных и функциональных покрытий, основываются на зависимости какого-либо информативного параметра от Т. Однако, выше было указано, что информативные параметры зависят не только от измеряемой величины, но и от ряда мешающих параметров, которые указаны для каждого из рассмотренных выше методов НК. Вместе с тем, в соответствии с действующей нормативной документацией, при изготовлении, калибровке и поверке существующих мер толщины контролируются только их геометрические параметры: толщина покрытия, разнотолщинность, шероховатость поверхности, без учета мешающих параметров, которые непосредственно влияют на результат измерения бесконтактными толщиномерами, определяя при этом действительное значение Т и неопределенность результата измерения. В связи с этим, представляется необходимой разработка новых стандартов на меры толщины, а также совершенствование поверочной схемы или разработка нескольких локальных поверочных схем.

Анализ современной стандартизации по НК контроля качества покрытий бесконтактными методами показал, что на сегодняшний день существуют нормативные документы на виды и методы НК, которые устанавливают требования к терминам и определениям, но не указаны требования к эталонам и средствам измерений, участвующих в передаче единицы и реализующим поверочную схему. Для устранения этого недостатка необходимо разработать нормативные документы на рассмотренные бесконтактные методы измерения толщины покрытий, которые будут устанавливать требования к толщиномерам, мерам толщины покрытий, а также требования к их поверке и калибровке. Анализ зарубежного опыта в части стандартизации показал следующее:

– стандарт озаглавливается по типу или типам покрытий и оснований, для которых может применяться рассматриваемый метод измерения;

 указывается задача измерения, в данном случае — измерение толщины покрытия;

– указывается рассматриваемый метод измерения.

В качестве примеров укажем следующие стандарты: ISO 21968, Nonmagnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials – Measurement of coating thickness – Phase-sensitive eddy-current method; ISO 2360, Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive basis materials – Measurement of coating thickness – Amplitude-sensitive eddycurrent method; ISO 2361, Electrodeposited nickel coatings on magnetic and non-magnetic substrates – Measurement of coating thickness – Magnetic method.

Однако, если мы более подробно рассмотрим эти стандарты, то увидим, что в них достаточно подробно описаны задачи измерения и физические основы метода. Однако, рассмотрение информативных и мешающих параметров и их влияние на результаты измерений носит описательный характер. Также нет четко изложенных требований к геометрическим и электрофизическим параметрам мер толщины покрытий, которые должны применяться для градуировки, поверки и калибровки толщиномеров. В стандартах отсутствуют схемы обеспечения прослеживаемости, без чего невозможна разработка поверочных схем.

Мешающие геометрические, физические, электрофизические и теплофизические параметры для каждого из бесконтактных методов должны контролироваться на этапах изготовления и поверки средств измерений в соответствии с представленной на рис. 7 схемой передачи размера единицы измеряемой величины *T* от мер к толщиномерам покрытий с учетом контроля мешающих параметров для каждого бесконтактного метода НК. В таком случае будет обеспечиваться метрологическая прослеживаемость.



Рис. 7. Схема передачи размера единицы величины от мер к толщиномерам покрытий с учетом контроля мешающих параметров для каждого бесконтактно-го метода НК

Одним из вариантов решения рассматриваемой проблемы обеспечения единства измерений в области толщинометрии покрытий бесконтактными методами, а также координации работ метрологических служб, производителей и потребителей бесконтактных толщиномеров покрытий представляется необходимым разработка стандартов:

1) металлические покрытия на магнитных и немагнитных металлических основаниях. Измерение толщины покрытиия вихретоковым фазовым методом;

2) неметаллические покрытия на металлических и неметаллических основаниях. Измерение толщины покрытия активным синхронным термографическим методом;

3) металлические и неметаллические покрытия на металлических и неметаллических основаниях. Измерение толщины покрытия β-отражения методом;

4) металлические и неметаллические покрытия на металлических и неметаллических основаниях. Измерение толщины покрытия рентгенофлуоресцентным методом.

Каждый стандарт должен быть выпущен в трех частях. Ч. 1. «Метод измерения». Ч. 2 «Поверка толщиномеров», которая должна содержать методику расчета расширенной неопределенности результатов измерений. Ч. 3. «Калибровка и поверка мер толщины покрытий», которая должна содержать основные условия, требования к производству мер толщины, описание поверки мер толщины и метрологической прослеживаемости, а также методику расчета расширенной неопределенности результатов измерений.

На основании стандартов должны быть разработаны поверочные схемы и средства измерения для их реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаджанов, Л. С. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий / Л. С. Бабаджанов, М. Л. Бабаджанова. – М. : Изд-во стандартов, 2004.

2. **ISO 21968:2005** Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallicbasis materials. – Measurement of coating thickness. – Phase-sensitive eddy-current method.

3. Бариска, А. Активный синхронный термодинамический метод измерения толщины диэлектрических покрытий / А. Бариска, Н. Райнке, В. А. Сясько // В мире НК. – 2016. – Т. 19, №1. – С. 14–16

4. Потапов, А. И. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / А. И. Потапов, В. А. Сясько. – СПб. : Гуманистика, 2009. – 904 с.

5. **Р50.2.006-2001** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне измерений толщины покрытий в диапазоне 1–20000 мкм. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001.

E-mail: <u>office@constanta.ru</u> <u>golubev@gost.ru</u> <u>nadezhda.i.smirnova@gmail.com</u>

УДК 620

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НК ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРЫ

Б. В. АРТЕМЬЕВ, О. Б. АРТЕМЬЕВА

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «СПЕКТР» Москва, Россия

UDC 620 USING NDT METHODS FOR CONSERVATION OF CULTURAL MONUMENTS B. V. ARTEMIEV, O. B. ARTEMIEVA

Аннотация

Совершенствование технологий формирования излучения: повышение стабильности источников, возможность точной регулировки например, анодного напряжения у рентгеновских аппаратов, высокая чувствительность и стабильность детекторов позволяют использовать оборудование неразрушающего контроля для обнаружения незаконных вложений и скрытых изображений.

Опыт использования оборудования неразрушающего контроля (НК) для идентификации, обнаружения незаконного перемещения произведений искусства и их реставрации.

Ключевые слова:

рентгеновский контроль, тепловидение, радиометрия, микроскопия, культурное наследие.

Abstract

Improving radiation generation technologies: increasing the stability of sources, the possibility of fine adjustment, for example, anode voltage in X-ray machines, high sensitivity and stability of detectors allow using non-destructive testing equipment to detect illegal investments and even hidden images.

Experience in the use of non-destructive testing equipment (NDT) for the identification, detection of illegal movement of works of art and their restoration.

Key words:

X-ray inspection, thermal imaging, radiometry, microscopy, cultural heritage.

Пионером использования методов неразрушающего контроля для анализа произведений искусства в России можно с уверенностью назвать художника Игоря Грабаря, который в 1919 г. проявил интерес к изучению произведений искусства с помощью ионизирующего излучения. Первая в СССР лаборатория физико-химических исследований художественных памятников открылась в 1925 г.

Для изучения произведений искусства используют широкий диапазон электромагнитного излучения от инфракрасного до рентгеновского включая оптическую (видимая область): бинокулярную и поляризационную микроскопию [1].

Изучение пигментов с помощью поляризационного микроскопа (рис. 1) в отраженном и проходящем свете с использованием лабораторного микроскопа Polarization Aggregate POLAM L-213M позволяет определить наличие в образце слоя чернил неорганической природы, уточнить состав белил, грунтовку и в некоторых случаях подтверждает наличие органических пигментов (например, фталоцианиновых красителей).





Рис. 1. Оптические бинокулярные и поляризационные микроскопы

Ультрафиолетовое излучение используется для анализа органических включений, состава грунтовки и пигментов и позволяет идентифицировать состав основы (например, мел, клей, масло и т. д.) и химические элементы, которые входят в краски.



Рис. 2. Инфракрасные микроскопы FTIR

Для исследования в инфракрасном диапазоне используют два типа тепловизоров: на охлажденных болометрах и на неохлаждаемых матрицах. В первом случае процесс управления – сканирование занимает больше времени, но точность выше (глубина тона до 18 бит на пиксель). Во втором случае динамический диапазон более узкий, но получается цифровое изображение с разрешением 1920х1080 и глубиной 14 бит на пиксель в доли секунды.

Исследования основы и органических пигментов с помощью ИКспектроскопии являются наиболее важным методом идентификации предварительного рисунка (карандаш, уголь, ручка или кисть). С помощью тепловизора возможно расшифровать полустертые надписи на подрамнике или задней части основания.

Различные материалы проходят, поглощают или отражают инфракрасные лучи иначе, чем видимый свет. Это является основой для изучения произведений искусства в инфракрасных лучах. Материалы, близкие по цвету, но отличающиеся по составу, по-разному реагируют на действие инфракрасных лучей, демонстрируя четкие границы. Таким образом, в инфракрасном диапазоне белизна выглядит самой яркой, желтые и оранжевые пигменты также освещаются. Но синие, зеленые и коричневые пигменты становятся темными или светлыми в зависимости от химического состава. Лаки, грязь, тонкие слои записей и мазков не являются препятствием для прохождения инфракрасного излучения. Этот метод позволяет распознавать почти стираемые отметки времени и подписи, скрытые под верхними изображениями, в том числе на обратной стороне холста. Графитовый карандаш, уголь и сажа хорошо идентифицированы и видны черным цветом. Черные даже самые тонкие чернила проявляются.

Съемка в отраженных ИК-лучах позволяет определить тонирующие и восстановительные записи, неразличимые под слоем поверхностного загрязнения или старого лака, чтобы выявить скрытые изображения, изменения состава автора. Характер начальной, подготовительной картины, которая может служить одним из критериев при определении подлинности работы.

Например, различия в картине Бориса Кустодиева (эскиз карандаш, скрытый краской) хорошо видны в ИК свете по сравнению с окончательным изображением (рис. 3).

Для ультрафиолетовых лучей сильная люминесценция старого лака является препятствием, скрывающим расположенные под ним записи, тогда как для возбуждения инфракрасной люминесценции слоя краски лаковая пленка не является препятствием. Возбужденный в цветном слое, этот вид излучения проходит через слой лака так же свободно, как видимый сине-зеленый свет, который возбуждает люминесценцию.



Рис. 3. Картина и первоначальный эскиз Бориса Кустодиева

Разумеется, для анализа работ живописи можно применить любой из перечисленных методов: рентгенография, дифракция рентгеновского излучения, малоугловое рассеяние, рентгеновская микротомография, рентгенофлуоресцентная спектрометрия, микро RF-спектрометрия и радиоспектрометрия под углами полного отражения, энергетическая дисперсионная рентгеновская спектроскопия, оптическая эмиссионная спектрометрия, CS / ONH – анализ углерода / серы.

Радиография широко используется в исследовании, но реальные результаты могут быть получены только в том случае, если картину можно сравнить со стандартными рентгенограммами картин, по крайней мере, конкретного художника. Именно поэтому крупные музеи и исследовательские центры постоянно пополняют коллекции таких фотографий. Как правило, они преобразуются и размещаются в цифровых библиотеках [2].

Для исследований используются специальные рентгеновские аппараты, в т. ч. микрофокусные. Как и в медицинских исследованиях, в лабораториях предусмотрена защита от высокого напряжения и радиации.

Живописная работа размещается горизонтально, под ней лежит пленка (детектор). Лучи проходят через изображение и создают теневое изображение на пленке. В особых случаях специалисты могут опробовать различные виды исследований, например, микрорадиографию (для получения увеличенных изображений), а также угловую и стереорадиографию (для получения информации об объемной структуре объекта). Полученная информация позволяет понять принципы: построения слоя краски, особенности грунтовки, метода нанесения мазка, моделирования форм и других авторских приемов, индивидуальных для каждого художника.

На этом изображении (рис. 4) мы видим верхний слой, нанесенный поверх скрытого изображения, которое было скрыто толстым слоем свинцовых белил. Если грунтовка равномерна, качество рентгеновского изображения намного выше, и изображение становится легко узнаваемым.

Данная методика так же позволяет определить степень повреждения объекта.



Рис. 4. Видимое изображение, рентгенограмма после фильтрации, скрытая картина

Получение разделенных рентгеновских изображений с помощью контактной рентгеновской дифракции обеспечивает важную информацию при изучении двусторонней живописи. Суть метода заключается в том, что во время съемки рентгеновская пленка находится в контакте с исследуемой поверхностью продукта, а рентгеновская трубка или исследуемый продукт перемещаются относительно друг друга. В этом случае можно получить удовлетворительное изображение слоя краски, в контакте с которыми была рентгеновская пленка, а противоположная сторона будет смазана.

Использование переносных рентгеновских аппаратов позволяет применять упрощенный метод контактно-контактной рентгенографии, когда пленка на пленке, прижатая к исследуемой поверхности, производится последовательно из нескольких точек. При таком способе качество рентгенограмм несколько снижается, но не требуется никаких дополнительных устройств.

Специальные методы рентгеновских исследований включают метод компенсации, который позволяет получать рентгеновские изображения паркетных картин без влияния на элементы крепления основания. Способ заключается в том, что зазоры между паркетным полом заполнены материалом, коэффициент поглощения которого совпадает с коэффициентом поглощения древесины паркета.

В тех случаях, когда произведение живописи размещено на металлической основе радиография невозможна. В этих случаях хорошие результаты для изучения слоя краски получают путем применения метода фотоэлектронографии. Суть метода заключается в том, что изображение на фотографической пленке формируется не непосредственно рентгеновским излучением, а электронами, излучаемыми поверхностью слоя краски под действием рентгеновских лучей. Они вызывают почернение пленки, контактирующей с передней стороной картины. Результатом является изображение, соответствующее распределению пигментов, которые интенсивно излучают электроны.





Рис. 5. Обычная фотография и фотоэлектронограмма, позволившая выявить детали изображения

Стационарная установка EAGLE, первоначально предназначенная для технологического контроля микроэлектронных продуктов, позволяет идентифицировать основные типы дефектов и изменения в конструкции электронных блоков, органических (древесных) и многослойных полимерных структур. Фокусное пятно 10 мкм, анодное напряжение регулируется от 20 до 150 кВ. Многообещающий инструмент для восстановления икон и произведений искусства на объемной и плотной основе. Использование двух или более напряжений для контроля позволяет оценить эффективный атомный номер основного материала и красителя. Визуальное разделение изображения не только по яркости теневого изображения, как это делается в традиционной радиографии, но и по материалам. Система работает по принципу низкоугловой томографии. Послойная визуализация позволяет эксперту изучить скрытые слои объекта, полностью избавляясь от теневых накладок других слоев.

Радиограммы помогают искусствоведу в выявлении подделок, подтверждении или идентификации авторства, а также определении времени создания произведения.

Параметры излучателя выбираются в зависимости от используемых приемников излучения: рентгеновской пленки, гибких пластин памяти люминофора или твердотельных матриц. Чем ниже энергия излучения, тем выше контраст изображения и наоборот, но в то же время есть дополнительные ограничения. Для твердотельных матриц необходимо обеспечить заданное отношение сигнал/шум. В отличие от пленки и пластин, пиксели матрицы имеют высокий уровень внутреннего шума, из-за этого время экспозиции должно быть ограничено.

Рентгенофлуоресцентный анализ (XRF) является одним из наиболее востребованных аналитических методов элементного анализа. Независимо от типа образца, измеряют ли жидкость, порошки или твердые образцы, XRF сочетает высокую точность с простой и быстрой подготовкой образцов [3]. Рентгенофлуоресцентные спектрометры позволяют измерять весь элементный диапазон от бериллия (Ве) до урана (U) в концентрациях от ppm до 100 %. В настоящее время стоимость оборудования снижается и становится доступным для экспертов в области искусства.

С помощью портативного рентгеновского флуоресцентного анализатора X-MET 7500 (OXFORD INSTRUMENTS, диапазон измеряемых элементов от Mg до U) можно провести элементный анализ определенной области живописи быстро и без предварительной выборки. В результате определяется процентное отношение массы всех химических элементов, составляющих область исследования. Метод XRF также успешно используется для определения состава металлических сплавов, в том числе при анализе ювелирных изделий.

Проблема незаконного оборота произведений искусства остро стоит в России и некоторых других странах с богатой историей. Рентгеновское оборудование, среди широкого круга задач, решаемых с его помощью, может использоваться для предотвращения незаконного оборота предметов искусства. Оптимальной конструкцией для решения этих задач можно считать комбинированную установку из трех частей – сканера, использующего ядерно-квадрупольный резонанс, многоракурсный рентгеновский сканер и сканер на тепловых нейтронах. Это решение не позволяет злоумышленнику скрыть предметы и предоставляет оператору исчерпывающую информацию о форме и химическом составе объекта контроля.

Стационарная рентгеновская интроскопия с двойной энергией предназначена для рентгеновского исследования отдельных предметов, посылок, пакетов и т. д. Созданы инспекционные комплексы для осмотра грузовых и легковых автомобилей, микроавтобусов и контейнеров различного типа с целью обнаружения запрещенных вложений (контрабанда, оружие, взрывные устройства, средства тайного извлечения информации и т. д.) без их вскрытия.

В некоторых случаях использование прямого прошедшего излучения для формирования рентгеновского изображения невозможно. Толщина контрольного объекта слишком велика и доза излучения для получения рентгенограммы удовлетворительного качества будет превышать допустимый уровень. В этом случае разумно использовать сканеры на основе обратно рассеянного излучения. Они обеспечивают контроль при одностороннем доступе к объекту. Разумеется, геометрическое разрешение изображения, полученного с их помощью, ниже, чем при использовании прямого прошедшего излучения, но наличие или отсутствие закладок в скрытых полостях однозначно раскрывается.

Выводы

Даже с использованием алгоритмов векторного анализа изображений, полученных методом теневой радиографии и наличия эталонных изображений в библиотеке изображений, возможны ошибки идентификации, как первого, так и второго рода, т. е. пропуска или ложного обнаружения. Необходимо расширять библиотеки изображений и организовывать международные публичные базы данных на платной основе.

Радиационные методы исследования картин могут предоставить полезную информацию для искусствоведов, но проблема не будет полностью решена, и поэтому необходимо разработать методы управления и создать новое оборудование, особенно в таких перспективных областях, как плоскостная томография, радиография на обратно рассеянном излучении и нейтронная радиография.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Boutaine, J. I.** A Survey of the Possibilities of Various Radiographic Techniques for the Non Destructive Examination of Cultural Heritage Artefacts. Applications of Radiation Science and Technology/ IAEA, Vienna, Austria, ICARST-2017.

2. Artemiev, B. I. Artemyev. Using X-Ray to detect Hidden Images on Priming Canvas. Applications of Radiation Science and Technology/ IAEA, Vienna, Austria, ICARST-2017.

3. Janssens, K. R. Van Grieken. Non-destructive Micro Analysis of Cultural Heritage Materials, P. 828, Elsevier Science.

УДК 339.545 МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОДЛИННОСТИ ДОКУМЕНТОВ И ЦЕННЫХ БУМАГ *А. И. ПОТАПОВ, И. В. ПАВЛОВ*

ГУ ВПО «Санкт-Петербургский Горный университет» Санкт-Петербург, Россия

UDC 620.39.545

NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS IN DETERMINING THE AUTHENTICITY OF DOCUMENTS AND SECURITIES A. I. POTAPOV, I. V. PAVLOV

Аннотация

В статье рассматриваются наиболее распространённые способы фальсификации современных документов (документов транспортных средств, паспортов, железнодорожных билетов, денег) и методы неразрушающего контроля определения подлинности документов и ценных бумаг, в т. ч. с помощью неспециализированной дефектоскопической аппаратуры.

Ключевые слова:

контроль подлинности документов; неразрушающий контроль; ультрафиолетовое излучение; инфракрасное излучение; оптические эффекты.

Abstract

The article discusses the most common methods of falsification of contemporary documents (vehicle documents, passports, train tickets, money) and non-destructive testing methods for determining the authenticity of documents and securities, including with non-specialized radiographic equipment.

Key words:

control of authenticity of documents; nondestructive testing; ultraviolet radiation; infrared radiation; optical effects.

Несмотря на развитие электронного документооборота, количество документов на бумажных носителях значительно расширился. Здесь и внутренний и заграничные паспорта; водительское удостоверение; технический паспорт на автомобиль; паспорт на квартиру, гараж, дачу; векселя, акции и многие другие документы, и конечно, деньги. Все эти документы гарантируют нам наши права, дают определённые возможности, но только в случае их подлинности. А вот в этом вопросе часто у нас нет полной уверенности. Развитие компьютерных программ и современных средств цветной полиграфии позволяет различного ранга фальсификаторам изготавливать очень приличного вида подделки. И это проблема мирового масштаба. Если 20–30 лет назад для изготовления поддельных ценных бумаг нужно было собрать целую бригаду фальсификаторов, в которую входили: художники-гильоширы, рисующие документ; гравёры, изготавливающие клише; механики, изготавливающие специальные печатные пресса; хими-

ки, изготавливающие краски; печатники и т. д., то в настоящее время с этой задачей справляется школьник, обладающий компьютером и приличным цветным принтером.

Что наши документы защищены от подделки знают все. Но вот как проконтролировать наличие этих защитных признаков и вообще, что контролировать – знают немногие. Сложилась тревожная ситуация: практически все наши документы защищены от подделки, имеются инструментальные и просто визуальные методы контроля подлинности, отличные отечественные приборы для контроля, а вот доступных широкому кругу граждан методик нет! И развешанные где-то под потолком в банках и кассовых центрах плакаты не вносят ясность в эти вопросы. Попытки самостоятельно решить этот вопрос могут привести к неприятным последствиям. Так, например, попытка рассмотреть через лупу или просто скопировать на ксероксе железнодорожный билет выявит на нём написанное большими буквами слово «ФАЛЬШЬ» (рис.1), что принесёт много неприятных минут, если не знать, что это как раз признак подлинности билета и защита его от размножения цветным копированием.



Рис. 1. Слово «ФАЛЬШ» в головке таблицы железнодорожного билета

Как обезопасить себя от разнообразных видов мошенничества в этой сфере: не купить автомобиль, квартиру, дачу с подложными документами, быть уверенными в подлинности заграничного паспорта, турваучера, оформленных в незнакомой турфирме, не оказаться за границей без средств к существованию, (а то и в тюрьме), но с полным кошельком «фантиков», проданных нам под видом евро или долларов. Как спокойно и с достоинством отстоять подлинность вашего паспорта или водительско-го удостоверения, объявленного подозрительным и на этом основании изымаемым недобросовестному представителю власти за тысячи километров от родного города – рассмотрению этих вопросов и посвящена настоящая статья. Мы рассмотрим вопросы контроля подлинности водительских удостоверений, паспортов транспортных средств, самоходных машин и, конечно, денег.

Многие уверены, что защитные признаки являются секретными и не подлежат контролю обычными гражданами. И действительно, секретные

признаки есть, но есть и большое количество защитных признаков, специально предназначенных для контроля гражданами и специализированными службами.

Контроль документов, денег, ценных бумаг (далее ЦБ) чисто дефектоскопическая задача или шире – задача неразрушающего контроля. ЦБ в процессе установления подлинности не может быть разрушена, подвергнута воздействию различных реактивов, кислот и т. д. А методы контроля, применяемые для контроля ЦБ – это общеизвестные ультрафиолетовые, визуальные, инфракрасные, магнитные, магнитно-оптические и т. д. Для защиты документов широко используются различные оптические эффекты (кипп-эффект, муаровый эффект MVC), растрирование изображения и т.д. Всё дело в знании защитных признаков и методике применения этих знаний на практике.

Защита от подделки ЦБ осуществляется с помощью комплекса защитных элементов, вносимых в ценную бумагу на разных стадиях её изготовления. Защита ценных бумаг от подделок обеспечивается за счет использования особых технологий, определенного сочетания способов и приемов нанесения полиграфического оформления, а также за счет применения специальных материалов [1]. Условно можно выделить три основных вида защиты:

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА представляет собой специфические особенности технологии подготовки исходных компонентов и их переработки, не применяемые при изготовлении обычных бумаг обычными методами полиграфии из-за их дороговизны и ограниченного доступа к ним. Такими особенностями являются:

– водяной знак бумаги или филигрань;

- защитные волокна;
- защитные нити;
- компонентные составы бумаг и красок;
- голограммы, кинеграммы и т. п.

ПОЛИГРАФИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА выражается в использовании определенного сочетания способов и приемов полиграфической печати, а также в нанесении на ценные бумаги специальных элементов полиграфическими способами. В ценных бумагах данный вид защиты доминирует по количеству используемых защитных элементов. Основными из них являются следующие:

– применение специальных видов печати (не применяемых в обычной полиграфии, часто из-за дороговизны процесса) и их сочетаний, реализуемых с помощью специальных машин (высокая, в том числе орловская и типоофсет; плоская, в том числе офсетная; глубокая, в том числе металлографская и т. п.);

– микропечать;

- скрытые изображения;
- графические элементы;
- фоновые сетки;

- графические ловушки;

– ирисные раскаты и т.п.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА основана на использовании в составах бумаги бланков ЦБ красок и защитных волокон добавок химических веществ, наличие которых может быть определено специальными методами. В качестве таких материалов в ценных бумагах применяются:

– люминесцентные вещества (люминофоры);

- гасители люминесценции;

– ферромагнитные краски;

- метамерные краски.

Рассмотрим кратко эти виды защиты и методы контроля их подлинности.

Технологическая защита

Фальсификаторы ценных бумаг лишь в очень редких случаях могут позволить себе изготовление самой бумаги на заказ. Одним из признаков денежной бумаги является отсутствие в ней оптических отбеливателей, вводимых в любую потребительскую бумагу. Поэтому подлинная бумага, применяемая для печати денег и документов, в ультрафиолетовых лучах не светится, а поддельная светится (рис. 2).



Рис. 2. Подлинная (сверху) и поддельная (снизу) 500-рублёвая купюры в ультрафиолетовых лучах 313 нм.

Бумага формируется (отливается) на сетке бумагоделательной машины из жидкой массы, состоящей из взвеси в воде волокнистых компонентов. В качестве волокнистых материалов применяются: древесная целлюлоза и древесная масса, а для высокосортных и прочных бумаг (денежных, вексельных) используется хлопковые, льняные или полиэфирные волокна. Механическая прочность зависит от степени размола волокна, чем выше разработка (размол), тем больше прочность бумаги. Для придания большей прочности и специальных свойств, бумага проклеивается в массе и с по-

верхности, в нее добавляются наполнители. Для защиты от подделок на стадии изготовления бумаги вводится металлизированная нить, тонкие цветные волокна, другие специальные материалы. Применяются также волокна, видимые только в определенном спектре (обычно при освещении ультрафиолетовыми лучами). Важнейшим требованием является износоустойчивость. Например, денежная бумага выдерживает несколько тысяч двойных перегибов, имеет большую прочность на разрыв и значительное сопротивление надрыву кромки.

Особое значение для денежной бумаги имеют водяные знак. Водяной знак образуется при отливе бумаги за счет различной толщины слоя волокна. Знак может быть общим, т. е. с непрерывно повторяющимся узором, или локальным – с рисунком, расположенным на листе бумаги в определенном месте.

Водяной знак используется в оформлении денежных знаков, ценных бумаг и бланков, предназначенных для изготовления ценных бумаг и различных рукописных документов (рис. 3, 4) уже несколько веков.



ЫЯНАЛЬНЫ БАНК

Рис. 3. Локальный и регулярный водяные знаки на пятисотрублёвой на современной белорусской банкноте российской банкноте эмиссии 1912 г.

Рис. 4. Локальный водяной знак

Бумаги с регулярным водяным знаком используются при печатании мелких (разменных) номиналов денег и изготовлении других ценных бумаг. Локальный водяной знак с середины прошлого века является неотъемлемым атрибутом купюр высокого достоинства как хороший способ защиты от подделки и, кроме того, он повышает художественный уровень денег и документов. Фальсификаторы, как правило, не могут себе позволить изготовление бумаги с водяными знаками и идут на различные ухищрения типа выцарапывания или вымывания водяного знака, местного пропитывания бумаги клеевыми массами и т.д.

Часто такие виды подделок хорошо обнаруживаются с помощью лупы, контактного тридцатикратного микроскопа или телелупы (например, лупы изготавливаемой Минской фирмой «Регула») в проходящем или косопадающем свете, особенно при использовании эталона.

ЗАЩИТНЫЕ ВОЛОКНА – отдельные синтетические или растительные волокна, введенные в бумагу при ее изготовлении дополнительно к основному волокнистому составу. Для этого преимущественно используют шелковые, полимерные и вискозные волокна толщиной 0,05-0,15 мм и длиной 3-7 мм. Обработанные люминофорами, аналогичными применяемым в капиллярной дефектоскопии, они светятся при освещении ультрафиолетовым излучением, очень наглядны и легко обнаруживаются, например, при использовании ультрафиолетового осветителя КД-33Л, применяемого в капиллярной дефектоскопии или с помощью специализированных приборов. При этом используется возможность получения стабильных спектральных характеристик люминесценции (цвет, интенсивность свечения) в многообразии реализуемых вариантов. Этим, в частности, пользуются при введении в бумагу бесцветных люминесцирующих в ультрафиолетовых лучах защитных волокон. При подделке бланков, защитные волокна обычно имитируют надпечаткой полиграфическим способом или вложением окрашенных волокон между склеенными листами подложки. Такие подделки, чаще всего, определяются при 7-10 кратном увеличении с помощью обычной лупы, телелупы (цветной видеокамеры с электронным или оптическим увеличением, сопряженной с монитором) или контактного микроскопа. При попытке отделить волокно с помощью иглы, через лупу хорошо видно, что поддельное, наклеенное волокно отделяется целиком. Волокна на подлинной ЦБ отделяются только частично, так как они внедрены в бумагу при её отливе и полностью отделяются только с подъёмом соседних волокон (рис. 5 и 6).





Рис. 5. Фрагмент видимого изоб- Рис. 6. Люминесценция ражения банкноты достоинством 10 того же фрагмента ЕВРО

ЗАЩИТНЫЕ НИТИ – узкие полоски фольги, металлизированной плёнки, введенные в структуру бумаги при ее изготовлении. Могут быть расположены целиком в толще бумаги или выходить через определённые промежутки на одну или разные стороны бланка ЦБ Нити определяются при изучении ценных бумаг в проходящем свете в виде непрозрачной или полупрозрачной полосы (рис. 7).

С целью повышения защитных свойств от сканирования и для облегчения идентификации на нитях специальными способами могут быть выполнены тексты (в прямом или зеркальном изображении) или осуществлена какаялибо другая обработка, например, обработка веществами, светящимися при освещении ультрафиолетовым излучением (люминофорами), причем люминесцирует чаще всего пленочная основа нити.



Рис. 7. Защитная нить белорусской банкноты (а) и её фрагмент (б) в проходящем свете

КИНЕГРАММЫ и ГОЛОГРАММЫ – металлизированные наклейки, изготовленные из специальной бумаги со слабыми когезионными и сильными адгезионными свойствами. При попытке их отделить, с целью переноса на другие ЦБ, они разрываются и теряют свои оптические свойства, заключающиеся в создании разных изображений при рассматривании под различными углами зрения (кинеграммы) или объёмных и радужных изображений (голограммы) (рис. 8 и 9).



Рис. 8. Кинеграмма паспорта транспортного средства (ПТС) (а) и её отдельные фрагменты (б, в) под разными углами освещения и наблюдения



Рис. 9. Подлинная (а) и поддельная (б) кинеграммы со стоевровой банкноты

Зеркальный эффект, которым обладают голограммы, служит для затруднения копирования (на ксерокопиях голограммы выглядят как безобразные чёрные пятна), а также для улучшения внешнего вида ЦБ [2, 3, 4].

Полиграфическая защита

СПОСОБЫ ПЕЧАТИ. Для изготовления ЦБ применяются основные способы печати – высокая, плоская и глубокая, а также специальные виды печати: металлографическая и орловская.

Указанные названия способов печати основаны на взаиморасположении печатающих и не печатающих (пробельных) элементов на печатной форме. На формах высокой печати печатающие элементы выступают над пробельными (отсюда – название «высокая»), на формах плоской печати, печатающие и пробельные элементы, находятся в одной плоскости; на формах глубокой печати печатающие элементы заглублены по отношению к пробельным. Более высокий уровень защиты обеспечивают усложненные разновидности названных способов печати – многокрасочные способы орловской и металлографской печати, типоофсет и др.

ВЫСОКАЯ ПЕЧАТЬ. При печати данным способом краска, предварительно нанесенная на печатающие элементы, передаётся под давлением на контактируемую с печатной формой бумажную подложку. На оттисках способ высокой печати может быть определен увеличении 6–40 крат по следующим основным признакам (рис. 10 и 11):

– по сгусткам краски, выдавленной на края печатных знаков;

- по деформации подложки в местах нанесения печатных знаков.

Следует отметить, что деформация бумаги от натиска печатной формы наиболее заметна на оборотной стороне документа при исследовании в косопадающем свете. Способом высокой печати на всех ценных бумагах печатаются серийные номера.



Рис. 10. Номер железнодорожного билета, выполненный методом высокой печати, слева – лицевая сторона, справа – оборотная, на которой видны продавленные цифры



Рис. 11. Номер десятирублёвой банкноты, выполненный высокой печатью и его увеличенный фрагмент, на котором чётко виден натиск краски

Необходимо отметить, что серийные номера всегда печатаются отдельно от основного изображения однотонной (чаще чёрной) краской с помощью специальной машины, чётко позиционирующей каждую литеру. Фальшивомонетчики обычно не изготавливают такие машины, а печатают серийные номера с помощью примитивных приспособлений, что легко выявляется при использовании, например, контактного 30-кратного микроскопа со шкалой, имеющей цену деления 0,05 или 0,01 мм, которая позволяет выявлять разное расстояние между литерами и их различную высоту.

При изготовлении многокрасочных оттисков в обычной полиграфии производят цветоделение и для каждого цвета (обычно 4 краски, которые при смешивании позволяют получить всю палитру цветов) готовится отдельная печатная форма. Поочередно делая оттиски на одном листе, при смешивании красок с различных форм, можно получить полнокрасочное изображение. Наложить краски с разных форм таким образом, чтобы они точно совпали в штрихах практически невозможно даже при самой совершенной технике. Однако это достигается в так называемой «ОРЛОВСКОЙ ПЕЧАТИ». Орловская печать изобретена в Гознаке в 1891 г. специалистом Экспедиции И. Орловым [2, 5]. Оригинальность данного вида печати состоит в том, что в печатный узел был введен мягкий эластичный вал и промежуточные формы-шаблоны, имеющие рисунок для каждого цвета оригинала. Каждый красочный рисунок шаблона передает свое изображение на соответствующее место сборочного вала, а с него все краски передаются на сборочную форму, имеющую рисунок всего оригинала. Точность совпадения красок на стыках линий и красота многоцветного изображения сделали орловскую печать одним из главных элементов рисунка бумажных денег. Кроме того, точность совпадения красок является важным методом защиты денег от подделки. Для изготовления денег и ценных бумаг орловская печать получила распространение в ряде стран мира.



Рис. 12. Исследование рисунка подкладной сетки Свидетельства о регистрации транспортного средства: на подлинном документе (а) при изменении цвета краски не происходит двоения или разрыва штрихов; на поддельном документе (б) наблюдаются разрывы штрихов или их двоение



Рис. 13. Десятирублёвая банкнота. Фрагменты, выполненные орловской печатью с плавным переходом цветов: а – деталь орнамента; б – микропечать цифры «0» номинала

Такие оттиски обладают очень высоким уровнем защиты, так как воспроизвести их другими способами невозможно, а использование оборудования орловской печати предоставлено исключительно Государственному производственному объединению ГОЗНАК без права перепродажи и передачи указанного оборудования другим предприятиям. Данным способом обычно печатают многокрасочные фоновые сетки, различные орнаменты, виньетки и другие средства декора. При большом увеличении всегда можно на различных участках ЦБ увидеть несовпадение штриховых линий, если они печатаются не за один поход, что возможно только при орловской печати.

ГИЛЬОШИРНЫЙ УЗОР – графические рисунки, образованные периодическими линиями, форма которых определяется математическими закономерностями. Использование гильоширных узоров в ценных бумагах весьма разнообразно (рис. 14).



Рис. 14. Гильоширный узор, розетка и ирисная печать на свидетельстве о регистрации транспортного средства

ИРИСНАЯ ПЕЧАТЬ – технологический прием исполнения многокрасочных изображений при однократном нанесении красок с единой печатной формы. Оттиски, полученные по указанной технологии, характеризуются плавным переходом одного цвета в другой (ирисовый раскат). Такой эффект достигается специальной конструкцией красочных аппаратов печатных машин, в которых краски попарно смешиваются с помощью «раскатного» валика.

Ирисная печать наиболее характерна для способа офсетной печати (плоской и высокой). При изготовлении ценных бумаг используется, в основном, для исполнения фоновых изображений и некоторых орнаментных элементов. Наиболее часто сетки печатают в две краски с двумя ирисовыми раскатами, при этом краевые полосы исполняют одной краской, а среднюю – другой краской. Используются и другие комбинации нанесения красок. С целью усложнения полиграфического оформления ценных бумаг осуществляется нанесение двух сеток с взаимно наложенными ирисовыми раскатами, в которых соединяются фрагменты, исполненные одной и той же краской в разных сетках. Таким образом, раскат какого-либо цвета одной сетки расширяется раскатом такого же цвета другой сетки без видимой границы перехода ирисовых раскатов.

Подделки ценных бумаг печатают обычно на однокрасочных печатных машинах, которые не приспособлены для получения ирисовых раскатов, что также легко обнаруживается при рассматривании через лупу или микроскоп.

При изготовлении ценных бумаг используется одна из разновидностей глубокой печати – МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПЕЧАТЬ (рис. 15, 16 и 17). Название объясняется применением металлического гравированного или травлённого металлического клише. Технология металлографической печати отличается сложностью на всех стадиях её изготовления, стабильностью, тонкой регулировкой режимов, применением особых материалов. Как и в случае с орловской печатью использование металлографического оборудования также предоставлено исключительно Государственному производственному объединению Гознак без права перепродажи и передачи указанного оборудования другим предприятиям. Указанные обстоятельства создают условия высокой защищенности оттисков, исполненных данным способом. Для них характерны следующие основные особенности:

– рельефность изображений, легко определяемая при увеличении в косопадающем свете и на ощупь;

- четкость исполнения.

Способом металлографической печати на ценных бумагах исполняют, преимущественно, элементы машинной графики – стилизованные рисунки, гильоширные рамки, розетки, орнаменты и другие оформительские элементы. Высокое качество печати позволяет «прятать» во фрагменты, напечатанные металлографией различные защитные элементы, невидимые без увеличения, например «корро».



Рис. 15. Элемент ПТС, напечатанный металлографией



Рис. 16. Защитный элемент «корро»: при небольшом увеличении центральной части предыдущего фрагмента становятся видными буквы «ПТС» (в данном случае «ТС»)



Рис. 17. Защитный элемент «корро» на десятирублёвой банкноте

На поддельных ЦБ такие элементы обычно печатают способом офсетной печати. С целью имитации рельефа оттисков, в основном, используют бесцветное тиснение изображений с оборотной стороны ценных бумаг.

МИКРОПЕЧАТЬ – элемент полиграфической защиты, представляющий собой изображения очень малых размеров (менее 0,3 мм). Микропечать обеспечивает защиту ценных бумаг от копирования из-за невозможности достижения при этом необходимого разрешения: при копировании с использованием разных способов сканирования или при растрировании изображений микропечать не воспроизводится, а при использовании фотомеханических процессов она передается со значительными искажения-МИ.

На подлинных ценных бумагах микропечать чаще всего реализуется в виде микротекстов, которые, будучи исполненными в виде последовательного ряда знаков (букв и цифр), образуют линейные графические элементы или фоновые изображения (рис. 18, 19 и 20).



Рис. 18. Фрагменты подлинной (а) и поддельной (б) 100-долларовой банкноты с микротекстом

a)



Рис. 19. Применение микротекста в медицинской справке, представляемой в ГАИ. Рисунок в правом углу справки (а) и его увеличенное изображение (б)



Рис. 20. Применение микротекста в оформлении десятирублёвой банкноты

ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТКИ – искусственно вносимые в элементы оформления микродефекты, предназначенные для быстрой диагностики подлинности ценной бумаги. В качестве таких элементов часто используют «чужие» буквы, т. е. буквы из шрифта, который отличается от основного. В штрихах текстов и других мелких элементах оформления могут исполняться специальные значки – «погрешности печати». Возможны и другие решения по созданию подобных меток. Обычно относятся к секретным защитным признакам, известным только эмитентам и заказчикам ЦБ.

Физико-химическая защита

МАГНИТНАЯ ЗАЩИТА – элементы физико-химической защиты, основанные на введении ферромагнитных компонентов в составные части ценных бумаг, в результате которого они приобретают магнитные свойства. Диагностика наличия ферромагнитных компонентов и их топографии (распределения по ценной бумаге) осуществляется с помощью детекторов, встроенных в соответствующие устройства, или специальных магнитооптических визуализаторов типа «МАГ» (рис. 21). В отдельных случаях диагностика ферромагнитных частиц возможна с помощью постоянных магнитов небольшого размера или вынесенных в мобильный датчик преобразователей типа воспроизводящих головок магнитофона.

Ферромагнитные частицы наиболее часто вводятся в полиграфические краски, и таким образом магнитные свойства приобретают соответствующие фрагменты изображений и отдельные реквизиты, например, номера, выходные данные и т.п. Эффективность магнитной защиты может быть значительно повышена при локальном распределении ферромагнитных компонентов в оттисках.



Рис. 21. Фрагмент магнитооптической визуализации наличия магнитных частиц в краске, которой напечатано обозначение серии на 100-долларовой банкноте

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ – свечение специальных красок. При воздействии на них невидимым электромагнитным излучением ультрафиолетовой части спектра отдельные электроны переходят на более высокие энергетические орбиты с захватом фотона воздействующего излучения. Через некоторое время они возвращаются в своё стабильное состояние с излучением фотона обратно. Но так как на эти переходы затрачивается определённая энергия, то излучаемый фотон имеет уже меньшую энергию, а значит большую длину волны излучения, которая лежит в видимом спектре. У разных веществ энергия перехода разная, что обуславливает свечение красителей в различных частях видимого спектра при возбуждении излучением одной длины волны.

Эффективную защиту этот элемент обеспечивает только в сочетании с применением специальных приемов нанесения. В противном случае люминесцирующие элементы оформления подделываются с высоким качеством с применением, например, люминесцентных пенетрантов.

МЕТАМЕРНЫЕ КРАСКИ – одноцветные краски, проявляющие контрастные свойства по отношению к инфракрасному излучению (одни – «прозрачны», другие – «непрозрачны») (рис. 22).



Рис. 22. Фрагмент 100-рублёвой российской банкноты, напечатанной метамерной краской в видимом свете (а) и в инфракрасных лучах (б), аверс и реверс 10 – рублёвой белорусской банкноты (в, г) в инфракрасных лучах

Для контроля метамерности красок используется специальное оборудование – стационарные видеоспектральные компараторы, например, «Регула 4305» Минской фирмы Регула. Этот элемент защиты относится к наиболее эффективным и до настоящего времени не воспроизведен в фальшивках. В настоящее время метамерные краски используются в ценных бумагах, изготовляемых на предприятиях Гознака, ООО «Н.Т.ГРАФ», ЗАО «ОПЦИОН», ЗАО «Краснодарбланкиздат».

ФОТОХРОМНЫЕ и ТЕРМОХРОМНЫЕ КРАСКИ – краски, изменяющие свой цвет, а также бесцветные материалы, приобретающие соответствующую окраску под воздействием излучений определенного спектрального диапазона (рис. 23). Фотохромные краски чувствительны к ультрафиолетовому излучению, а термохромные – к инфракрасному (тепловому). Приобретенный цвет сохраняется в течение некоторого времени в зависимости от интенсивности воздействующих излучений, а затем восстанавливается первоначальный. В дефектоскопии применяется большое количество ультрафиолетовых и инфракрасных излучателей, например, КД-33Л для люминесцентной дефектоскопии.



Рис. 23. Фрагмент банкноты напечатанной OVI-краской под разными углами наблюдения

(Optically Variable Inc) – краски, изменяющие цвет в зависимости от расположения оттиска относительно глаза наблюдателя. Так, например, при наклоне поверхности стодолларовой купюры цвет цифры 100 меняется от золотистого к зеленому.

Эффект изменения цвета OVI- красок связан, предположительно, с интерференцией света в тонких пленках частиц, входящих в состав этих материалов. Качественной имитации OVI-красок в практике не отмечено, однако стоимость ценной бумаги с таким элементом защиты возрастает значительно.

Из приведенного выше анализа видно, что при известных навыках дефектоскописта и при наличии самой распространенной аппаратуры можно контролировать качество ценных бумаг, а также печатей, бланков и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фальшивые деньги (фальшивомонетничество) / Б. С. Болотский [и др.]; под ред. проф. В. Д. Ларичева. – М. : Экзамен, 2002. – 384 с.

2. **Павлов, И. В.** Методы и средства контроля подлинности документов, ценных бумаг и денежных знаков: учеб.-справ. пособие / И. В. Павлов, А. И. Потапов. – СПб., 2005. –349 с.

3. Валиев, С. Х. Защита ценных бумаг / С. Х. Валиев, Б. Т. Эльтазаров. – М. : ЧеРо, 1997. – 156 с.

4. Жилкин, И. М. Способы защиты бланков ценных бумаг. Методика проверки. Ценные бумаги / И. М. Жилкин // Информационный бюллетень. – 2002. – № 2. – С. 55–60.

5. **Павлов, И. В.** Контроль подлинности документов, ценных бумаг и денежных знаков: учеб.-справ. пособие / И. В. Павлов, А. И. Потапов. – М. : Техносфера, 2006. – 472 с.

УДК 378.14

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ В БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

С. С. СЕРГЕЕВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 378.14

PRACTIS-FOCUSED TRAINING OF PERSONNEL IN NON-DESTRUCTIVE TESTING IN THE BELARUSSIAN-RUSSIAN UNIVERSITY S. S. SERGEEV

Аннотация

Описаны особенности организации и опыт практико-ориентированной подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике на кафедре «Физические методы контроля» в Белорусско-Российском университете. Приведены цели и задачи практико-ориентированного образования и показана сущность деятельностно-компетентностного подхода. Отражены особенности организации сквозного проектирования, государственного экзамена, дипломного проектирования и практик студентов.

Ключевые слова:

практико-ориентированная подготовка, компетенция, сквозное проектирование, образовательный стандарт.

Abstract

Features of the organization and experience of practis-focused training of specialists in non-destructive testing and technical diagnostics at the Department of Physical Methods of Control at the Belarusian-Russian University are described. The goals and objectives of practis-focused education are given and the essence of the activitycompetence approach is shown. The features of the organization of end-to-end design, state examination, thesis design and student practices are reflected.

Key words:

practis-focused training, competences, cross-cutting design, educational standard.

Одной из основных проблем образования в нашей республике эксперты называют значительные трудности выпускника, овладевшего набором теоретических знаний, в их практической реализации. Об этом же говорят итоги анкетирования студентов, которые первоочередной потребностью считают умение и способность решать практические задачи и проблемы. Наличие диплома об образовании не гарантирует занятости, выпускник вынужден переучиваться, доучиваться на рабочем месте. Сегодня работодатель желает видеть молодого специалиста не только вооруженного набором знаний и умений, но и способного применять их в различных производственных ситуациях, ставить задачи, находить их оптимальное практическое решение, нести ответственность за свою деятельность и действия членов команды, с которыми ему предстоит работать.

В новых образовательных стандартах, по которым сегодня ведется подготовка специалистов, сформулированы все виды профессиональной деятельности и выделены составляющие их профессиональной компетентпроектная, производственно-технологическая, организационноности: управленческая, научно-исследовательская и инновационная. К огромному сожалению, в нашей республике отсутствуют профессиональные стандарты, поэтому, как правило, перечень компетенций, в том числе и профессиональных, формируют сами вузы, осуществляющие подготовку специалистов, без участия работодателей. Например, в России в настоящее время утверждено более трехсот профессиональных стандартов по различным видам деятельности, в том числе и по неразрушающему контролю, которые целесообразно использовать в качестве основы для сопряжения с образовательными стандартами всех уровней, для формирования программ обучения в системе дополнительного профессионального образования. Они позволяют работодателям на языке компетенций (знаний, умений, навыков и опыта деятельности) по уровням квалификации взаимодействовать с образовательными организациями. Наличие актуальных (действующих) национальных профессиональных стандартов в определенной области экономической деятельности или по конкретной профессии является важным основанием для использования их как базы при формировании содержания образования по соответствующей специальности профессионального образования. Строго говоря, разработчики программ профессионального образования обязаны следовать требованиям действующего национального профессионального стандарта, поскольку он отражает актуальные запросы консолидированных работодателей, а не отдельных представителей предприятий, с которыми организовано взаимодействие вуза.

Повышению профессиональной компетентности студента способствует междисциплинарная интеграция в обучении, под которой понимается целенаправленное усиление междисциплинарных связей в условиях сохранения теоретической и практической целостности учебных дисциплин, то есть применение знаний по одной дисциплине при изучении другой. Первые два курса обучения оказывают огромное влияние на приобретение базисных знаний. Именно в первые два года в процесс обучения вводятся дисциплины общепрофессионального цикла, которые ориентируют студента в выбранной профессии, вносят свой вклад в формирование и становление основных профессиональных компетентностей специалиста. Такими дисциплинами из общепрофессионального цикла по специальности 1-540102 – «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» являются: инженерная графика, теоретические основы электротехники, механика материалов и конструкций, материаловедение, технология конструкционных материалов, метрология, основы стандартизации, детали приборов и другие. Данные дисциплины направлены на приобретение студентами знаний об общих правилах выполнения чертежей, о физических полях, об электротехнических элементах и законах, принципах работы механизмов и систем, о технологии получения и обработки материалов, о методах и средствах измерения, о расчетах типовых элементов конструкций машин и механизмов. Эти знания представляют собой традиционную профессиональную компетенцию, которая является основой деятельности специалиста в области контроля качества и диагностики. Данные дисциплины выступают как связующее звено со специальными дисциплинами, включенными в программу старших курсов. Таким образом, можно говорить о важности данного цикла. В данном случае прослеживаются междисциплинарные связи, которые мы понимаем как применение знаний по одной дисциплине при изучении другой. При этом обеспечиваются сквозные линии в содержании обучения, то есть создаются условия для осуществления преемственности между дисциплинами всего цикла обучения. Междисциплинарные компетентности существенно повышают готовность студента к будущей работе.

В сегодняшних условиях, при подготовке специалистов высшего профессионального образования, все более востребован индивидуальный практико-ориентированный подход к обучению, который обеспечивает в образовательных моделях реализацию и более широкое использование компетентностного подхода, что связано с расширением образовательного пространства в рамках реализации Болонского процесса. Результаты образования, выраженные на языке компетенций – это путь к расширению академического и профессионального признания и мобильности, к увеличению сопоставимости и совместимости дипломов и квалификаций. В нашей республике реализация компетентностного подхода может выступить дополнительным фактором поддержания единого образовательного, профессионально-квалификационного и культурно-ценностного пространства с соседними странами.

Для инженерного образования переход к практико-ориентированной подготовке представляется крайне актуальным. Целью практикоориентированного образования является подготовка специалистов высокой квалификации, обладающих набором академических, профессиональных и социально-личностных компетенций, востребованных на рынке труда и способных в короткий период времени адаптироваться к условиям конкретного рабочего места.

При этом основными задачами практико-ориентированного образования являются:

 эффективное взаимодействие с организациями-заказчиками кадров, выявление набора компетенций, востребованных на современном рынке труда, вовлечение организаций и их высококвалифицированных сотрудников в образовательный процесс; – разработка и актуализация образовательных программ на основе мониторинга рынка труда и прогнозирования компетентностной модели специалиста;

 повышение внутренней и внешней мобильности субъектов образовательного процесса, внедрение передового опыта в создание практикоориентированной образовательной среды;

 повышение конкурентоспособности выпускников за счет оптимального сочетания фундаментального и практико-ориентированного образования;

– развитие методологической и инновационной культуры преподавателей и сотрудников, совершенствование их профессиональной компетентности, необходимой для реализации принципов практикоориентированного образования.

Определяющую роль для качества выпускников играет этап проектирования практико-ориентированных образовательных программ, который включает:

 – создание системы взаимодействия с учреждениями общего среднего, среднего специального и профессионально-технического образования для обеспечения качества подготовки абитуриентов университета, создания стабильного контингента;

– организация проектирования и разработки образовательных программ совместно с организациями и предприятиями-заказчиками кадров;

 обновление перечня и содержания дисциплин компонента учреждения образования и дисциплин специализации в учебных планах в соответствии с актуальными и прогнозируемыми потребностями профессиональной сферы;

 предоставление возможности студентам получить, в ходе освоения образовательных программ высшего образования, рабочую профессию или иную квалификацию уровня среднего специального или профессиональнотехнического образования.

Существенная роль отводится совершенствованию профессиональной компетентности преподавателей и сотрудников университета. Для этого должно быть реализовано:

– изучение, разработка и внедрение практико-ориентированных форм и методов обучения;

– организация целенаправленного обучения преподавателей современным практико-ориентированным технологиям обучения;

 направление преподавателей выпускающих кафедр в организациизаказчики кадров по профилю деятельности с целью усвоения передового опыта практической деятельности в соответствующей сфере;

– привлечение к участию в программе «Приглашенный профессор» выдающихся специалистов-практиков, имеющих признанные достижения в области своей профессиональной деятельности, с целью передачи опыта как студентам, так и преподавателям университета.

На сегодняшний день выделяют три основных подхода, которые отличаются как степенью охвата элементов образовательного процесса, так и функциями студентов и преподавателей в системе практикоориентированного обучения.

Наиболее узкий подход связывает практико-ориентированное обучение с формированием профессионального опыта студентов при погружении их в профессиональную среду в ходе учебной, производственной и преддипломной практики. Второй подход, при практико-ориентированном обучении предполагает использование профессионально-ориентированных технологий обучения и методик моделирования фрагментов будущей профессиональной деятельности на основе использования возможностей контекстного изучения профильных и непрофильных дисциплин. Наконец, в третьим, наиболее широким соответствии с подходом, практикоориентированное образование должно быть направлено на приобретение кроме знаний, умений, навыков – опыта практической деятельности с целью достижения профессионально и социально значимых компетентностей. Это обеспечивает вовлечение студентов в работу и их активность, сравнимую с активностью преподавателя. Мотивация к изучению теоретического материала идёт от потребности в решении практической задачи. Данная разновидность практико-ориентированного подхода является деятельностно-компетентностным подходом.

Таким образом, для построения практико-ориентированного образования необходим новый, деятельностно-компетентностный подход.

Поиск путей повышения качества подготовки специалистов к практической профессиональной деятельности и формирование профессиональных компетенций у будущих специалистов привел к созданию таких технологий в обучении, которые моделируют профессиональную деятельность студентов в учебном процессе. Имитация студентами профессиональной деятельности в ходе решения учебных задач, как правило, обеспечивает овладение необходимыми профессиональными знаниями и навыками. Кроме того, наличие современной лабораторной базы, выполнение лабораторных работ, в том числе и, в первую очередь, исследовательской направленности, а также проведение части работ в лабораториях предприятий, что практикуется на кафедре «Физические методы контроля», способствуют совершенствованию процесса формирования профессиональных компетенций и закладывает основы для формирования научно-технического мышления студентов. Для эффективного формирования профессиональных компетенций будущих специалистов технических специальностей необходимо глубокое погружение в техническую инженерную среду за счёт: внедрения в учебный процесс технологий, имитирующих будущую профессиональную деятельность; сотрудничества с передовыми предприятиями соответствующего профиля; проведения всех видов практик на производстве; использования знаний, полученных на предприятиях в реальном курсовом и дипломном проектировании.

Сегодня при подготовке специалистов с высшим профессиональным образованием необходимо строить учебный процесс так, чтобы он был максимально приближен к будущей практической деятельности выпускников, в значительной степени ориентирован на конкретные нужды производства. Вузы должны уделять больше внимания и выделять больше учебного времени в своих рабочих учебных планах не для лекционных занятий, а для практической подготовки студентов за счет часов, отводимых на лабораторные работы, производственную практику и научно-исследовательскую работу.

Одним из важнейших путей учебной мотивации студентов является развитие у них интереса к изучаемой дисциплине и ко всему процессу обучения в целом. Если перед студентом все время ставить посильные задачи и давать пути их решения, у него будет создаваться ощущение собственного роста. Особенно важно в этом случае, чтобы студент получал значимый для него конечный результат задачи, эксперимента или проектного решения. Серьезное внимание должно быть уделено развитию творческих способностей студентов. Достижение этой цели обеспечивается соответствующей технологией обучения. Поэтому переход к решению субъективнотворческих задач должен осуществляться постепенно, по мере повышения образовательного потенциала студентов.

Важное место в овладении навыками применения теории занимают курсовые проекты и работы. Требования к объему и содержанию проектирования должны вытекать из реального фонда времени, отведенного в учебном плане. Поскольку этот фонд, как правило, невелик, студенты могут лишь выполнить расчет по типовой методике и оформить записку. Для повышения творческой направленности проектирования существуют и реализуются два пути: выдача комплексных проектов и работ на группу студентов (2–3 чел.); объединение курсового проектирования по нескольким дисциплинам и увязка его с тематикой НИРС. Такие сквозные работы являются хорошей базой для дипломного проектирования и обеспечивают выполнение законченной разработки. Учебный план по специальности 1-540102 составлен таким образом, что достаточно четко прослеживаются междисциплинарные связи в виде сквозных модулей, в рамках которых реализуются проектирование и разработки.

Эффективность сквозного проектирования можно рассматривать в нескольких аспектах. Непрерывное накопление знаний по основным направлениям подготовки специалиста. Постепенное наращивание объема разработок и результатов исследований и их совершенствование и адаптация к конкретным объектам контроля и управления. Сквозное проектирование создает хорошую мотивацию и стимулирование для студентов.

Перспективной видится ситуация, при которой часть курсовых и дипломных проектов будет выполняться по заказам предприятий и организаций-потребителей выпускников вузов. Желательно, чтобы при выполнении курсовых и дипломных проектов – студенты различных направлений и специальностей объединялись бы в творческие и рабочие группы. Вся работа над такими «комплексными» проектами должна быть направлена на получение конкретного конечного результата и проводиться в рамках научно-исследовательских работ, финансируемых промышленными предприятиями и организациями, на которых в дальнейшем будут работать молодые специалисты. Безусловно, эта проблема очень сложная с точки зрения решения организационных и правовых вопросов.

Уровень подготовки выпускников к профессиональной деятельности проверяется в процессе государственного экзамена по специальности, а также в ходе дипломного проектирования и защиты проекта.

Госэкзамен организован на кафедре «Физические методы контроля» как практико-ориентированный и проводится в условиях, приближенных к реальным. Практико-ориентированный государственный экзамен проверяет готовность выпускника осуществлять на реальном объекте будущей профессиональной деятельности или на модели такого объекта производственные функции, которые невозможно оценить методом стандартизованного тестирования. Целью практико-ориентированного государственного экзамена является оценивание качества разрешения выпускником типовых задач деятельности и демонстрация соответствующих умений и навыков в приближенных реальным. Содержание условиях, к практикоориентированного государственного экзамена формируется в соответствии с образовательным стандартом по специальности с учетом профессиональных компетентностных требований к выпускнику. При этом каждому студенту предлагается решить конкретную комплексную профессиональную задачу, максимально приближенную к реальным производственным условиям. Серьезное внимание при подготовке к экзамену уделяется созданию сервисного обеспечения, которое формируют сами студенты, используя информационные фонды кафедры, университетской библиотеки и Internet. Для подготовки к комплексному государственному экзамену студентам предоставляется две недели, в течение которых проводятся практикоориентированные занятия и консультации по различным видам неразрушающего контроля и диагностики.

Тематика дипломных проектов определяется и формируется на основе заказов предприятий и тематики НИР кафедры и представляет совокупность производственных и учебных задач. В основном все проекты являются итогом 2-х, 3-х летней работы студентов в выбранном направлении. Научно-технический уровень проектов достаточно высокий, а тематика актуальна и соответствует современному уровню развития техники и технологии. Во всех проектах студентами применяются методы математического и физического моделирования. В дипломных проектах рассматриваются практически все виды неразрушающего контроля и технической диагностики, которые наиболее широко используются в нашей республике: ультразвуковой механизированный и автоматизированный контроль; радиационные и магнитные методы контроля материалов и сварных соединений; оптический, тепловой и радиоволновой контроль материалов и изделий; контроль герметичности труб и емкостей методами течеискания; оптические методы обработки изображений.

В большинстве проектов студентами представляются конструкторские разработки новых устройств, приборов и систем неразрушающего контроля.

Тематика курсового и дипломного проектирования соответствует профилю подготовки специалистов. Содержание тем проектов строится на фактическом материале предприятий и результатах научной работы кафедры, отличается реальностью и актуальностью.

Методическое обеспечение дипломного проектирования представляет собой совокупность методических указаний и электронных пакетов и включает:

 методические указания к дипломному проектированию (структура и правила оформления проектов);

– примеры оформления сопровождающих плакатов;

– электронный пакет образцов всех типов чертежей;

– электронный пакет нормативных документов по неразрушающему контролю и диагностике;

– электронный пакет литературных источников для дипломного проектирования.

Часть результатов дипломных проектов, выполненных по заказам предприятий, внедряется в промышленную практику. В 2014 и 2015 гг. дипломные проекты студентов Скворцова А.Ю. и Никитина А.С. были отмечены премией правительства Республики Беларусь, как лучшие в республике в области обеспечения качества.

Лабораторная техническая база кафедры постоянно совершенствуется и обновляется за счет использования для образовательных целей экспериментальных стендов, макетов и установок, созданных в рамках выполнения госбюджетных и хоздоговорных НИР. В течение 2009–2016 гг. в рамках Государственной программы по подготовке кадров для ядерной энергетики Республики Беларусь кафедрой приобретено новое, в т. ч. и уникальное импортное оборудование для учебных лабораторий на сумму более 2 млрд р. Для университета приобретены нормативные документы и учебнометодическая литература по неразрушающему контролю и диагностике, оборудованы 3 мультимедийных класса. При этом учитывались значимость и объемы применения отдельных видов контроля в промышленности. В связи с этим, большинство современного оборудования закуплено по ультразвуковому, магнитному, тепловому, вихретоковому и визуальнооптическому методам.

Приобретенные приборы и системы позволяют студентам реализовывать самые передовые европейские и мировые технологии неразрушающего контроля и технической диагностики на реальных образцах и объектах в лабораториях кафедры. Достаточно отметить, что студенты работают с си-
стемами ультразвукового контроля, позволяющими реализовать технологии фазированных решеток, TOFD-метода, автоматизированной толщинометрии и др. На кафедре «Физические методы контроля» функционируют специализированные учебные лаборатории: «Акустический контроль», «Электромагнитный контроль», «Оптический, тепловой и радиоволновой контроль», «Капиллярный контроль и радиационная дозиметрия», «Контрольно-измерительная техника».

Кафедра активно сотрудничает с ведущими ВУЗами России (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Национальный исследовательский университет «МЭИ», Санкт-Петербургский горный университет и др.), что позволяет эффективно использовать их положительный опыт и наработки в организации научных исследований, учебного процесса и методическом обеспечении. Кроме того, сотрудничество с НАН Республики Беларусь (на основе долгосрочных договоров) в частности с Институтом прикладной физики НАН Республики Беларусь позволяет эффективно использовать кадровый и научный потенциал институтов для совершенствования подготовки квалифицированных специалистов. Приглашаются ведущие специалисты вузов, предприятий и проектных организаций для чтения лекций, проведения консультаций для слушателей, студентов, магистрантов и аспирантов.

Результаты научных исследований и разработок кафедры широко внедряются и используются в учебном процессе (теория, технология, макеты приборов, установок и систем, программные продукты). Это обеспечивает более эффективную практическую подготовку специалистов. На основе НИР кафедры поставлены специальные учебные дисциплины, а также ряд лабораторных работ, курсовых и дипломных проектов.

Таким образом, построение процесса практико-ориентированного образования в университете позволяет максимально приблизить содержание и процесс учебной деятельности студентов к их будущей профессии, дает возможность проектировать целостный образовательный процесс, в котором учитываются такие факторы, как специфика учебных дисциплин, особенности и возможности каждого участника образовательного процесса, а также помогает создавать условия для целенаправленного формирования конкурентоспособности будущих специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике.

УДК 620.179.16

СОВРЕМЕННЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ТИПА ВВЭР

А. Х. ВОПИЛКИН, Д. С. ТИХОНОВ

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+» Москва, Россия

UDC 620.179.16

ACTUAL AUTOMATED MEANS AND METHODS OF ULTRASONIC TESTING OF EQUIPMENT AND PIPELINE WELD CONNECTIONS OF WWER TYPE REACTOR UNITS *A. CH. VOPILKIN, D. S. TIKHONOV*

Аннотация

В докладе рассматриваются методы автоматизированного УЗК (АУЗК) сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС с ВВЭР с использованием современных методов визуализации данных, а также некоторые специальные решения для наиболее актуальных вопросов неразрушающего контроля при эксплуатации АЭС.

Основные методы визуализации дефектов в настоящее время реализованы в системе АУЗК с антенными решётками АВГУР-АРТ и находят всё большее эксплуатации АЭС, применение процессе в при a также В предэксплуатационного контроля. Повышение качества получаемых изображений дефектов уже в настоящее время позволяет создавать программные комплексы с автоматическим формированием пространственных контуров дефектов и заключений об их размерах. Также рассматриваются направления дальнейшего совершенствования методов визуализации данных ультразвукового контроля с определением размеров дефектов.

Ключевые слова:

автоматизированный ультразвуковой контроль, визуализация, сканирование, антенные решётки, АЭС, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, эксплуатационный неразрушающий контроль, предэксплуатационный неразрушающий контроль.

Abstract

The report considers methods of automated ultrasonic testing (AUT) of welded joints of equipment and pipelines of NPPs with WWER using modern data visualization methods, as well as some special solutions for the most pressing issues of nondestructive testing in the operation of nuclear power plants.

The main methods of defects visualization are currently implemented in the AUGUR-ART AUT system with antenna arrays and are increasingly used in the operation of NPPs, as well as in the process of pre-exploitation testing. Improving the quality of the acquired images of defects already at present allows creating software

complexes with automatic formation of spatial contours of defects and conclusions about their sizes. The report also looks at ways to further improve the methods for visualizing ultrasound data with the defect sizes.

Key words:

Automated ultrasonic testing, visualization, scanning, antenna arrays, phased arrays, nuclear power plants, WWER-1000, WWER-1200, operational non-destructive testing, pre-operational non-destructive testing.

Классификация методов УЗ визуализации

Для решения основной задачи УЗК современные технологии используют различные методы получения изображений, среди которых наиболее точными являются методы с когерентной обработкой полученных УЗ эхосигналов. С точки зрения основных физических принципов и актуальности можно рассмотреть пять основных групп методов визуализации данных УЗК [1, 2].

К первой группе методов относятся всевозможные некогерентные отображения способы эхо-сигналов на пространственной сетке. привязанной к объекту контроля. Такие методы, использующие обычный растровый способ отображения УЗ сигналов в виде В-, С-, D- или других разверток, применяются во многих традиционных дефектоскопах. Также к этим методам относятся и различные вариации метода TOFD [3]. К данной группе могут быть отнесены не только те методы, которые используют традиционные одноэлементные преобразователи, но также и методы применения антенных решёток, когда они используются в режиме традиционных преобразователей с изменяющимися параметрами поля, например, в режимах линейного или секторного сканирования, когда одна антенная решётка используется как набор нескольких прямых или наклонных преобразователей [4]. Такой подход используется, например, при применении антенных решёток по технологии зонального разделения области контроля [5].

Ко второй группе методов отнесём различные алгоритмы когерентной обработки данных для механически перемещающихся одноэлементных преобразователей. Их суть сводится механическому основная к синтезированию пространственной апертуры с целью последующего преобразования трехмерные изображения данных двух-И В С алгоритмов когерентной обработки. Среди таковых использованием наиболее известны алгоритмы, основанные на приближённом решении обратной скалярной задачи рассеивания. Наиболее активно используемыми алгоритмам такого класса являются Synthetic Aperture Technique (SAFT) [6], метод Проекции в Спектральном Focusing Пространстве (ПСП), который в зарубежной литературе также называется Fourier Transformation Synthetic Aperture Focusing Technique (FT-SAFT) [7]. В этой группе следует выделить когерентные методы, знаменующие собой постепенный переход от решения скалярной задачи к решению векторной

задачи, в том числе и методы, учитывающие всевозможные переотражения зондирующего и отраженного поля на границах объекта контроля, а также преобразования типов волн на границах объекта контроля И несплошностях. Учитывая многосхемный получения характер изображений, такие методы иногда обозначаются приставкой Multi, например, Multi-SAFT.

Первый опыт применения систем с использованием алгоритмов первой и второй группы на АЭС РФ описан в [8].

Третья группа методов включает в себя методы динамической аппаратной фокусировки антенных решёток (АР) и антенных матриц (2Dи 3D-фокусировка). Эти методы используют многоканальную аппаратуру излучения и приёма ультразвуковых импульсов с индивидуальной для каждого канала регулировкой задержек при излучении и приёме. В изображении, получаемом при одном положении антенной решётки, методом динамической фокусировки можно сформировать ограниченное фокусировки, обычно количество областей располагаемых на фиксированных траекториях. В большинстве современных приборов эти траектории совпадают с линиями области контроля обозначаемыми терминами «по лучу», «по глубине», «по вертикали» и т. п. Аппаратные ограничения не позволяют сформировать изображение с равными свойствами фокусировки по всей области контроля. В настоящее время эти формирования изображений широко применяются методы в многоканальных дефектоскопах с антенными решётками, выпускаемые большим количеством производителей. Среди них наиболее известны такие мировые компании как Olympus (с дефектоскопами Omniscan и Focus), Zetec (Topaz, Quartz, Zircon, Dynaray), Sonatest (Harfang), General Electric (Phasor), M2M (Gekko) и т.д.

Четвёртая группа методов связана с идеей цифровой фокусировки многоэлементных антенн. Для последующей математической обработки методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [9, 10] используется всё множество эхо-сигналов, полученных от комбинаций пар элементов излучатель-приемник. В докладе [11] такой метод назван Total Focusing Method (TFM) и этот термин широко используется в англоязычной литературе, а в статье [12] схему полной попарной регистрации данных с последующим получением изображения методом C-SAFT предложено называть методом цифровой фокусировки антенны (ЦФА). Одно ИЗ важнейших преимуществ ЭТОГО метола возможность его ____ расширительного применения для сканирующих антенных решёток. Когерентное совмещение механического и электронного синтезирования апертуры антенны дает многократное улучшение качества изображения, как по разрешающей способности, так и по отношению сигнал/шум. При этом, по аналогии со второй группой методов, обработка может проводиться как вдоль одной из осей сканирования, и тогда она обозначается как 2D-ЦФА (ЦФА-Х, ЦФА-Ү), так и по обеим осям, в этом случае будем применять обозначение 3D-ЦФА (ЦФА-ХҮ).

Метод C-SAFT может быть адаптирован для учёта влияния известных границ особенностей объекта, многосхемных вариантов распространения ультразвуковых волн, а также преобразования типов волн при их отражении. По аналогии со второй группой методов будем называть эти способы получения изображений методами Multi-ЦФА. Следует отметить, что в настоящее время очень незначительное количество образцов современного оборудования для антенных решёток поддерживают метод ЦФА. Одним из таких, пока ещё редких приборов, является российская система АВГУР-АРТ, реализующая, наравне с традиционными методами применения антенных решёток, такие мощные методы как 2D-ЦФА, 3D-ЦФА и Multi-ЦФА.

К пятой группе методов визуализации отнесём все методы, использующие более точные способы решения обратной задачи, но не нашедшие пока широкого применения из-за высоких ресурсных требований к вычислительным средствам.

Принципы выбора методов визуализации дефектов для задач практического АУЗК

В основе создания оборудования и методов контроля объектов лежит определение методов получения изображения дефектов. Из этого определения вытекают основные требования к схемам сбора данных, параметрам сканирования, алгоритмам, вычислительным средствам, методам анализа данных и прочим базовым параметрам системы контроля. Установление связи параметров методов визуализации с возможностью решения тех или иных задач практического АУЗК лежит в основе выбора того или иного метода получения изображения дефектов. Таким образом, первоначально из всех требований решения задачи контроля необходимо, в первую очередь, выделить требования, определяющие выбор метода визуализации. Среди таковых основными являются требования:

– выявляемость дефектов с учётом их локализации (контролируемая область и область возможного расположения преобразователей) и типов индикатрисы рассеяния для всех видов дефектов (форма и ориентация дефектов), а также требования равномерности выявляющей способности по всей зоне контроля;

– различаемость полезного сигнала от дефектов при наличии различного типа артефактов (ложных сигналов, структурных шумов, конструктивных отражателей и пр.);

– учёта влияния факторов, искажающих образ дефекта (геометрия или неровности поверхности ввода УЗ волн, факторы учёта всевозможных переотражений и преобразования типов волн и пр.);

– разрешающей способности (лучевая и фронтальная в различных плоскостях) на различных глубинах контроля.

Применение технологии цифровой фокусировки антенной решётки для контроля сварных соединений коллекторов первого контура с патрубками ДУ1200

Руководствуясь указанными принципами для задачи контроля узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000 (ПГВ-1000М), ПГВ-1000МКП реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в качестве метода визуализации был выбран метод ЦФА и его усиленная модификация метод ЦФА-Х.

Метод ЦФА-Х используется при получении данных в режиме двойного сканирования. При двойном сканировании выполняется множество измерений в раздельном режиме при разных координатах излучателя для последующей совместной обработки. Подобная схема излучения и приема применяется при использовании алгоритма C-SAFT.

Применяя алгоритм ЦФА с использованием фазированной антенной можно добиться существенного увеличения решетки, отношения сигнал/шум, что весьма актуально для выявления трещин на самой ранней стадии развития, когда их раскрытие очень мало или наоборот плотно зашлакованных дефектов, когда условия на их границе формируют очень слабую отражённую волну. В этом алгоритме помимо отдельного использования элемента антенной решетки в совмещенном режиме, используются также всевозможные сочетания излучения и приема каждого элемента. При этом общее число независимых циклов измерения по отношению к обычному SAFT увеличивается в M = (N-1)/2 раз, где N – элементов антенной решетки. С учетом когерентного количество накопления это приводит к увеличению отношения сигнал/случайный шум \sqrt{M} в раз (по отношению к традиционному методу динамической фокусировки антенной решётки). При когерентном накоплении также уменьшается вклад эхосигналов, возникающих при переотражении и трансформации волн.

Необходимо отметить, что по результатам исследований при УЗК СС аустенитных трубопроводов Ду300 было показано, что фокусировка методами C-SAFT и ФАР, основанными на одних и тех же принципах дают близкие по геометрическим параметрам выявляемые несплошности: минимально выявляемые несплошности имеют следующие размеры – длина не более 10 мм и высотой не более 1,5 мм. При этом погрешности определения размеров составляют: длины несплошностей ± 10 мм и высоты ± 2 мм в 95 % доверительном интервале (по результатам приемочных испытаний проекта методики УЗК аустенитных сварных соединений Ду300). Вместе с тем, следует учитывать то обстоятельство, что при использовании метода ЦФА происходит фокусировка во всей области визуализации изображения, тогда как в случае метода ФАР фокусировка происходит только для некоторой ограниченной области,

заданной законом фокусировки, фокусным расстоянием и диапазоном углов ввода.

Для демонстрации преимущества сплошной фокусировки, которую обеспечивает ЦФА, в программе CIVA было выполнено моделирование процесса УЗК в области контроля 80 мм по глубине и 80 мм по ширине при одном положении АР.

На рис. 1 представлена эмуляция результатов контроля в режиме ФАР-дефектоскопа отверстий бокового сверления диаметром 2 мм, которые на рисунке изображены окружностями красного цвета. На глубине 100 мм блики сфокусированы с предельным разрешением для данной АР и призмы. При удалении отражателей от линии 100 мм фокусировка падает в несколько раз, и блики, удалённые от линии фокусировки, смещаются от своих истинных положений более чем 5 мм.



Рис. 1. Изображения отверстий бокового сверления, полученные при эмуляции режима ФАР-дефектоскопа

На рис. 2 показаны изображения, полученные по методологии ЦФА. Можно видеть, что блики не смещены от своего правильного положения, а фронтальная разрешающая способность при обнаружении несплошностей, удалённых от линии фокусировки, в сравнении с режимом ФАР-дефектоскопа приблизительно в три раза лучше.

В связи с применением технологии ЦФА возникла необходимость создания алгоритмов, компенсирующих снижение амплитуды сигнала по мере удаления от точки ввода УЗ волн и построения аналога АРДдиаграмм (диаграммы для традиционного контроля устанавливающие зависимость амплитуды эхосигнала от эквивалентного радиуса искусственного отражателя и дальности его расположения) для антенных решеток в режиме цифровой фокусировки.



Рис. 2. Изображения отверстий бокового сверления, полученные методом ЦФА

В программном обеспечении системы АВГУР-АРТ реализована программа по расчету двухмерных АРД-диаграмм для режима ФАР. Изначально в ней задаются геометрические и акустические параметры антенной решетки, призмы и объекта контроля, закон фокусировки и диапазон изменения фокусируемых лучей (в соответствии с параметрами S-скана в дефектоскопах). Далее задаются параметры плоскодонных отверстий: глубина залегания и диаметр. После расчёта на выходе программа выдает куб чисел, соответствующий амплитудам плоскодонных отверстий для заданного диапазона глубин, диаметров и углов. Все определённости, нормированы амплитуды, для по выбранному отражателю, соответствующему, например, плоскодонному отверстию, расположенному на глубине 10 мм, диаметром 1,6 мм, на угле 60 градусов (нормировочный отражатель для применения критериев оценки качества). Ноль в кубе данных соответствует нормировочному отражателю, а все остальные отражают разность с ним по амплитуде в дБ.

При выполнении настройки дефектоскопа в комплекте с антенной решёткой в выбранном режиме фокусировки на настроечном образце с одним или двумя плоскодонными отражателями и выполнении расчёта АРД, обеспечивается измерение эквивалентной отражающей способности при использовании антенных решеток в режиме фокусировки. Точность расчётов амплитуд изображений при расчёте АРД-диаграмм достигает значения ±1,5 дБ. Для измерения отражающей способности дефектов требуется настройка на образце с плоскодонным отражателем. Это позволяет привязать расчётные АРД-диаграммы к реальной чувствительности.

С целью увеличения зоны прозвучивания в области галтельного перехода до 100 мм от внешней поверхности узла приварки и повышения достоверности контроля целесообразно проводить прозвучивание

антенной решёткой с конусной поверхности узла. Данная схема уже используется в методиках ручного контроля. Схема контроля по конусной поверхности представлена на рис. 4.

При контроле с конусной поверхности используется то же оборудование, что и при сканировании по цилиндрической поверхности. При этом, увеличивается развертка дефектоскопа до 150 мм. Если дефектоскоп-ФР работает в режиме ФАР, используется закон фокусировки постоянной глубины на расстоянии 95–100 мм.

На рис. 4 пунктирной зеленой линией выделена зона прозвучивания узла приварки при использовании сканирования по конусной и цилиндрической поверхностям. Если сравнить ее с зоной прозвучивания, представленной на рис. 3 можно сделать вывод, что сканирование по конусной поверхности позволяет полностью проконтролировать галтельный переход внутреннего кармана R20.



Рис. 3. Схемы контроля по цилиндрической поверхности на продольно ориентированные дефекты



Рис. 4. Схема контроля по конусной поверхности на продольно ориентированные дефекты

На рис. 5 приведены примеры изображений реальной несплошности в области галтельного перехода, полученные с конусной и цилиндрической поверхностей объекта контроля.



Рис. 5. Изображения одной несплошности в области галтельного перехода кармана, полученные при контроле с конусной (сверху) и цилиндрической (внизу) поверхности

На рис. 6 приведены ещё примеры выявления коррозионных повреждений при прозвучивании с конусной поверхности.

В результате выбора новой техники визуализации дефектов удалось заметно усовершенствовать действующую методику применения антенных решёток для контроля узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 парогенераторов ПГВ-1000, с точки зрения улучшения отношения сигнал и шум, и обеспечения выявления слабо отражающих дефектов.



Рис. 6. Примеры коррозионных повреждений, выявленных при контроле с конусной поверхности УПКП. Слева высота повреждения достигает 7,5 мм, справа – 2,5 мм

Новые методы визуализации дефектов при АУЗК аустенитных и разнородных сварных соединений реакторных установок ВВЭР

Одной из актуальных задач УЗ контроля является задача контроля объектов, когда прозвучивание только на прямом или однажды отражённых лучах не обеспечивает выявление всех видов дефектов в заданной области контроля. При этом применение схем с многократным отражением волн от внутренней и внешней поверхностей для повышения

дефектов (или повышения коэффициента выявляемости углового распределения) таких объектов приводит к тому, что отражатель формирует длинную цепочку из эхо-сигналов по множественным схемам переотражений, в том числе различными типами волн. Интерпретировать такую картину с использованием традиционных подходов, определить координаты и размеры дефекта, выполнить оценку качества по амплитудным критериям становится практически невозможно. Такие проблемы возникают при контроле тонкостенных сварных соединений с широкими валиками усиления и других подобных задачах, когда преобразователь по тем или иным причинам не может быть установлен в непосредственной близости от области контроля.

В качестве примера на рис. 7 показано расположение бликов различных отражателей, получаемых по некоторым отдельным схемам восстановления изображения. Видно как формируется изображение различных ракурсов отражателя, которые невозможно было бы увидеть, используя только одну схему получения изображения.



Рис. 7. Формирование суммарного изображения на примере объемного (сверху) и сквозного вертикального (внизу) отражателей по различным схемам восстановления изображения с использованием только одного типа волны

Основными преимуществами предложенного подхода являются:

1) повышение способности к выявлению дефектов, выявление дефектов сложной конфигурации;

2) автоматический процесс формирования результирующего изображения;

3) легко интерпретируемый простой результат, поддающийся автоматическому анализу.

Многосхемный метод также нашёл своё применение при контроле соединений. разнородных сварных Наибольшую аустенитных И эффективность этот метод обнаруживает при сравнении с другими способами контроля на объектах большой толщины. При таком контроле используются одноэлементные преобразователи продольных и сдвиговых типов волн, а также антенные решётки на призмах, излучающие в объект контроля продольные и сдвиговые волны [13]. При формировании суммарного изображения используются схемы для прямых продольных лучей, схемы с преобразованием типа волн на дефектах и донной поверхности, а также схемы с использованием сдвиговых волн на прямом и зеркально отраженном лучах.

Для каждой из схем используется алгоритм 3D-ПСП, увеличивающий вклад полезного сигнала при когерентном накоплении, а для антенных решёток – алгоритм 3D-ЦФА. За счёт более эффективного накопления полезного сигнала, при различных схемах контроля, происходит также достижение наибольшего значения сигнал/шум в суммарном изображении, чем в каждом из парциальных.

Пример дополнительных возможностей открывающихся при использовании двух схем контроля в разнородном сварном соединении приведён на рис. 8. На рис. видно, как использование схемы с преобразованием типа волн маскирует шумовые сигналы, оставляя в корне шва только сигналы от плоскостных отражателей. Для получения изображений использовался метод алгоритм 3D-ЦФА с одномерной линейной 16-элементной антенной решёткой с рабочей частотой 5,0 МГц и шагом 0,8 мм, с номинальным углом ввода продольной волны в сталь 45°; при двухкоординатном сканировании с шагом 2 мм по обеим осям.

Плоскостные несплошности



Рис. 8. Парциальные изображения плоскостных несплошностей в корне разнородного шва толщиной \approx 70 мм, полученные при обработке методом ЦФА-XY с типом волны L-L (слева) и L-T (справа)

Основным фактором, влияющим на снижение качества изображения результирующего ПО применению данных методов восстановления изображений, является предположение изотропности аустенитных сварных соединений. Безусловно, данное среды ДЛЯ предположение является довольно грубым, поэтому качество окончательного изображения пока далеко от идеала. Однако результаты, продемонстрированные в работе [14] позволяют надеяться на то, что в скором времени реальное распределение скорости в области контроля можно будет использовать при восстановлении парциальных изображений, тем самым приблизив качество изображения в таких швах к качеству, достигаемому в изотропных средах.

Применение многомодовых и трёхмерных схем визуализации дефектов для фазированных решёток при контроле разнородных сварных соединений переходного кольца и патрубка Ду1100 парогенераторов энергоблоков с реакторной установкой ВВЭР-440 и других аустенитных и разнородных сварных на реакторных установках ВВЭР позволило достичь качественно нового результата с точки зрения повышения отношения сигнал/шум и выявления опасных дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базулин, Е. Г. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Ч. 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решётками / Е. Г. Базулин, А. Х. Вопилкин, Д. С. Тихонов // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 8. – С. 7–22.

2. Базулин, Е. Г. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Ч. 2. Повышение отношения сигнал/шум. / Е. Г. Базулин, А. Х. Вопилкин, Д. С. Тихонов // Контроль. Диагностика. – 2015 г. – № 9. – С. 10–27.

3. **Григорьев, М. В.** Определение размеров трещин ультразвуковым методом / М. В. Григорьев, В. В. Гребенников, А. К. Гурвич // Дефектоскопия. – 1978. – № 1. – С. 8–12.

4. **Michael Moles**, Noël Dubé, Simon Labbé and Ed Ginzel. Pipeline Girth Weld Inspections using Ultrasonic Phased Arrays., WCNDT 2004 - World Conference on NDT, Aug 30 – Sep 3, 2004 – Montreal, Canada, paper code 85.

5. ASTM, American Society for Testing and Materials, ASTM E-1961-98, «Standard Practice for Mechanized Ultrasonic Examination of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focused Search Units», September 1998.

6. Implementation of real-time ultrasonic SAFT system for inspection of nuclear reactor components / Hall T.E. [et. al.] // Acoustical Imaging. – 1987. – Vol. 15. – P. 253–266.

7. Бадалян, В. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве / В. Г. Бадалян, Е. Г. Базулин // Акуст. журн. – 1988. – Т. 34. – № 2. – С. 222–231.

8. Бадалян, В. Г. Опыт применения ультразвуковой системы с когерентной обработкой данных «Авгур» на Российских АЭС / В. Г. Бадалян, А. Х. Вопилкин / Контроль. Диагностика. – 2000. – № 9. – С. 35–39.

9. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция / Ковалев А.В. [и др.] // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С. 29–41.

10. Базулин, Е. Г. Восстановление изображения дефектов методом C-SAFT по эхосигналам измеренным антенной матрицей в режиме тройного сканирования / Е. Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2012. – № 1. – С. 3–19.

11. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models / S. Chatillon [et al.] // NDT in Canada 2009 National Conference.25-27August,2009.URL:http://www.ndt.net/article/aspnde2009/papers/10.pdf (дата обращения: 01.08.16).

12. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов / В.А. Воронков [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 1. – С. 64–70.

13. УЗК аустенитных сварных соединений: І. Применение многопараметровых методов для повышения эффективности. II. Новые возможности при применении автоматизированных систем / В. В. Гребенников [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2003. – № 1 (19). – С. 10–15.

14. Базулин, Е. Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учётом анизотропии материала объекта контроля / Е. Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2015. – № 4. – С. 42–52.

E-mail: vopilkin@echoplus.ru dtikh@echoplus.ru

УДК 534-16

АНАЛИЗ РАССЕИВАЮЩИХ СВОЙСТВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ С НЕОДНОРОДНОЙ ЖЁСТКОСТЬЮ СВЯЗИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

К. Е. АББАКУМОВ, Б. Ч. И

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» Санкт-Петербург, Россия

UDC 534–16

ANALYSIS OF THE SCATTERING PROPERTIES OF CYLINDRICAL INCLUSION WITH INHOMOGENEITIES OF THE INTERFACE *K. E. ABBAKUMOV, B. C. I*

Аннотация

Рассмотрены рассеивающие свойства цилиндрического рассеивателя, находящегося в твёрдом изотропном полубесконечном пространстве. Методом конечных элементов построена модель цилиндрического отражателя, состоящего из графита и находящегося в металлическом полубесконечном пространстве. Проанализированы поперечное сечение рассеяния и смещения.

Ключевые слова:

цилиндрический рассеиватель, метод конечных элементов, графит, сталь, потом механической энергии, смещение, поперечное сечение рассеяния.

Abstract

The scattering properties of a cylindrical inhomogeneity located in a solid isotropic semi-infinite space are considered. The finite element method is used to construct a model of a graphite cylindrical inhomogeneity in a metallic semi-infinite space. The scattering cross section and displacement are analyzed.

Key words:

cylindrical inhomogeneity, finite element method, graphite, steel, then mechanical energy, displacement, scattering cross section.

Введение

Ультразвуковая дефектоскопия занимает одно из ведущих мест в изучения инструмента материалов. качестве сплошности При теоретическом исследовании рассеивающих свойств различных математические неоднородностей используют ИХ идеализированные Например, протяжённых неоднородностей модели. для описания бесконечный используют модель типа цилиндр. Ввиду идеализированности модели, в ней не учитывается множество параметров, которые могли бы дать дополнительную информацию о строении неоднородности. Одним из таких параметров является неоднородность контакта между неоднородностью и вмещающей средой.

Для математического описания неоднородности границы используются нормальная и тангенциальная составляющие модуля контактной жёсткости KGN и KGT соответственно, входящих в граничные условия (1)

$$u_{r}^{I} = u_{r}^{II} + \frac{\sigma_{rr}^{II}}{KGN};$$

$$u_{\theta}^{I} = u_{\theta}^{II} + \frac{\sigma_{r\theta}^{II}}{KGT};$$

$$\sigma_{rr}^{I} = \sigma_{rr}^{II};$$

$$\sigma_{r\theta}^{II} = \sigma_{r\theta}^{II},$$
(1)

где u_r, u_{θ} – компоненты смещения; $\sigma_{rr}, \sigma_{r\theta}$ – компоненты тензора напряжения, цифры *I*, *II* соответствуют вмещающей среде и неоднородности соответственно. Существование таких граничных условий было доказано в [1]. Значения *KGN* и *KGT* варьируются от $10^{12} - 10^{17} \text{ H/}_{\text{M}^3}$, и моделируют

переход от свободной границы к «сварному» контакту.

Постановка задачи

Пусть на упругую цилиндрическую неоднородность радиусом r_0 с параметрами $c_l^{II}, c_t^{II}, \rho^{II}$ – скорость продольной волны, скорость поперечной волны, плотность, соответственно, из упругой среды с параметрами $c_l^{I}, c_t^{I}, \rho^{I}$ – скорость продольной волны, скорость поперечной волны плотность соответственно, падает, вдоль оси у плоская волна (рис. 1). На границе раздела неоднородность – вмещающая среда наблюдается нарушение акустического контакта, размеры которого равны φ_0 . Введём цилиндрическую систему координат r, θ .



Рис. 1. Постановка задачи

Центр начала координат совмещён с центром цилиндрической неоднородности. Необходимо определить рассеянное поле. Решать поставленную задачу будем методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе COMSOL.

Метод конечных элементов

Метод конечных элементов – численный метод решения интегральных и дифференциальных уравнений в частных производных [2]. Основные идеи метода конечных элементов (МКЭ) были сформулированы в 1920 г. усилиями Мэйни [3] и Остенфельдом [4] при решении задач исследования рамочных и фермовых конструкций. С развитием электронных вычислительных машин МКЭ получил распространение в других областях науки.

Суть метода заключается в разбиении исследуемой области на конечное количество подобластей. Подобласти могут быть треугольными, квадратными и других геометрических форм. Внутри подобласти выбирается вид аппроксимирующей функции исследуемого параметра. Составляется система алгебраических уравнений, количество уравнений в которой равна количеству узловых точек, и решается исходная система.

Для решения поставленной задачи методом конечных элементов, была нарисована геометрическая область (рис. 2).



Рис. 2. Исследуемая геометрическая область: 1– среда *I*; 2 – среда *II*; 3 – сектор с нарушенной адгезией; 4 – идеально согласованный слой

В зонах 1 и 2 решается дифференциальное уравнение вида

$$\rho\omega^2 u = \nabla\sigma,\tag{2}$$

где ρ – плотность; ω – круговая частота; u – смещение; ∇ – оператор Гамильтона. Для сектора 3 наложены граничные условия (1), учитывающие модули контактной жёсткости *KGN* и *KGT*. Ввиду того, что МКЭ не применим к бесконечным областям, необходимо использовать идеально согласованный слой. Идеально согласованный слой (ИСС) – поглощающий слой, устроен так, что волны, падающие на ИСС из не ИСС слоя, не отражаются от границы раздела между ними. Это свойство позволяет поглощать входящие волны без отражения их обратно в исследуемую область [2].

Так как МКЭ является численным методом, то для решения необхо-

димо задать параметры материалов. Параметры материалов приведены в табл. 1. Значения $KGN = KGT = 10^{13} \text{ H}/_{\text{M}^3}$. Область разбивалась на тре-

угольные элементы размерами $\lambda/_{14}$, где λ – длина волны.

	c_l , ^M / _C	c_t , ^M / _C	ρ , ^{Kr} / _{M³}
Среда І	5900	3100	7800
Среда ІІ	3100	820	2400

Табл. 1. Значения KGN, KGT и параметры материалов

Результаты

На рис. З показана зависимость поперечного сечения рассеяния Q от волнового размера $k_l r_0$. Поперечное сечение рассеяния определяется как отношение потока полной энергии, рассеянной в полный телесный угол на бесконечно большом расстоянии от цилиндрического включения, к потоку энергии в падающей волне через площадку, перпендикулярную направлению распространения и равную площади поперечного сечения рассеивающего цилиндрического включения.

$$Q = \frac{E_{\rm orp}^*}{E_{\rm nag}^*}$$

где $E_{\text{отр}}^* = -\oint_S \sigma \frac{du}{dt} n_i dS$ — энергия отражённой волны; $E_{\text{пад}}^*$ — энергия падающей волны; n_i — нормаль к контуру *S*.



Рис. 3. Зависимость поперечного сечения рассеяние

Из рис. З видны многочисленные резонансные эффекты во всём диапазоне волнового размера.

На рис. 4–7 представлены зависимости амплитуды смещения от угла θ при значениях $k_l r_0 = 0,005$; 0,2; 2,3. Видно, что нарушение адгезионной связи влияет на амплитуду, например, на рис. 4 наблюдается падение амплитуды в секторе с нарушенной адгезией, а на рисунках 5, 6, 7, наоборот возрастание амплитуды.



Рис. 4. Угловая зависимость амплитуды смещения при различных значения ях *KGN, KGT* и $k_l r_0 = 0,005$. Зелёная линия – *KGN, KGT*=10¹⁷ H/_{M³}; синяя линия – *KGN, KGT*=10¹³ H/_{M³}



Рис. 5. Угловая зависимость амплитуды смещения при различных значениях *KGN*, *KGT* и $k_l r_0 = 0,2$. Зелёная линия – *KGN*, *KGT*=10¹⁷ H/_{M³}; синяя линия – *KGN*, *KGT*=10¹³ H/_{M³}



Рис. 6. Угловая зависимость амплитуды смещения при различных значениях KGN, KGT и $k_l r_0 = 2$. Зелёная линия – KGN, KGT= 10^{17} H/_{M³}; синяя линия – KGN, KGT= 10^{13} H/_{M³}



Рис. 7. Угловая зависимость амплитуды смещения при различных значениях KGN, KGT и $k_l r_0 = 3$. Зелёная линия – KGN, KGT= 10^{17} H/_{M³}; синяя линия – KGN, KGT= 10^{13} H/_{M³}

Выводы

Представленное решение задачи исследования рассеивающих свойств цилиндрической неоднородности показывает, что нарушения адгезионной связи влияет на энергетические характеристики поля, проявляется резонансное рассеяние, что, в свою очередь, сказывается на амплитуде смещения рассеянного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rokhlin, S. I. Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids / S. I. Rokhlin, Y. J. Wang // J. Acoust. Soc. Am. -1991. - N. 89. - P. 503.

2. **Митчелл, Э.** Метод конечных элементов для уравнений с частными производными / Э. Митчелл, Р. Уэйт. – М. : Мир, 1981.

3. Maney, G. B. Study of engineering / G. B. Maney // – No 1, Univ. of Minnesota. Mineapolis, Minn., 1915.

4. **Ostenfeld, A.** Die Deformationsmethode / A. Ostenfeld. – Berlin : Springer – Verland OHG, 1926.

E-mail: <u>KEAbbakumov@etu.ru</u>

ee.boris.eut@gmail.com

УДК 620.179.16

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ РАССЕИВАЮЩИХ СВОЙСТВ МИКРОШЕРОХОВАТОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ТВЕРДЫХ СРЕД

К. Е. АББАКУМОВ, Б. Ч. И

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» Санкт-Петербург, Россия

UDC 620.179.16

BOUNDARY CONDITIONS MODERNIZATION UNDER ESTIMATION OF SCATTERING PROPERTIES OF SOLID-SOLID MIRCOROUGHENED INTERFACE K. E. ABBAKUMOV, B. C. I

Аннотация

В приближении длинных плоских волн получены в явном виде, и проанализированы аналитические выражения для модулей контактных жесткостей, определяющих свойства граничных условий в приближении «линейного скольжения» на микрошероховатой границе твердых сред с учетом параметров шероховатостей. Указанные выражения использованы при анализе коэффициентов отражения и прохождения упругих волн.

Ключевые слова:

твердая среда, упругие продольные и поперечные волны, шероховатость, параметры шероховатости поверхности, контактные жесткости; коэффициенты отражения и прохождения.

Abstract

By long plane waves approximation analytical solutions were derived in an explicit form for contact stiffness modules, which determine properties of boundary conditions in «linear slip» approximation at mircoroughened solid-solid interface with consideration of roughness parameters, and were analyzed. These solutions were used for analyzing of elastic waves reflection and transmission coefficients.

Key words:

solid medium, elastic longitudinal and transverse waves, roughness, parameters of roughness, contact stiffness, reflection and transmission coefficients.

Граница раздела жестко соединенных твердых сред представляет собой поверхность, на которой как упругие силы сцепления, так и упругие перемещения непрерывны. Таким образом, при решении задач о гармоническими волнами вблизи границы раздела между двумя различными жестко соединенными упругими средами, волновые решения для одной среды должны получаться из решений для другой среды, учитывая состояние границы раздела. В общем случае имеется шесть скалярных уравнений, связывающих вектор усилий и вектор перемещений по одну из границ раздела через соответствующие составляющие по другую сторону [1]. Эти условия служат для нахождения значений системы коэффициентов отражения и прохождения, объединяющих волновые решения для каждой среды. Данная схема может быть распространена на случай границы при одном из нарушений в её строении, связанном, например, с нежестким соединением сред, допускающим отклонение от выполнения условий непрерывности перемещений в распространяющихся волнах.

Под нежестким соединением далее будем понимать такое, при котором на границе раздела непрерывны усилия сцепления, но отсутствуют поля малых перемещений [2, 3]. Предполагается, что вектор малых разрывов в перемещениях линейно зависит от вектора усилий сцепления. В общем случае такая функциональная связь может выражаться как через действительные частотно независимые параметры, или может быть комплексной, зависящей от частоты, характерной для вязкоупругих сред. Это условие на границе раздела сред, называемое условием линейного скольжения [4], заменяет условия непрерывности перемещений. Для использования этих условий при аналитических преобразованиях, необходимо строго сформулировать условия линейного скольжения в рамках теории упругости и учесть возможность введения упрощений путем привлечения свойств изотропии.

Попытки разработки физико-математического аппарата, более полно учитывающего многообразие явлений взаимодействия на границе связываемых областей, были осуществлены в ряде работ, среди которых можно отметить, например [4], в которой было сделано допущение о неполной передаче составляющих упругих смещений при сохранении упругих напряжений. Недостатком указанной работы является отсутствие физической модели, объясняющей возникновение разрывов в передаче упругих смещений и модели количественного описания степени жёсткости связей на контактирующих поверхностях, что существенно снижает возможности использования достигнутых результатов для практических целей.

При записи граничных условий для компонентов тензора упругих напряжений предполагалось, что соответствующие его компоненты непрерывны. Для записи разрывных граничных условий для упругих смещений учитывалось, что в случае трансверсально-изотропной среды с аксиальной симметрией матрица коэффициентов жесткости, *KG* будет содержать только три независимых компонента, и, в рассматриваемой системе координат, будет иметь вид:

$$[KG] = \begin{bmatrix} KGT & 0 & 0 \\ 0 & KGN & 0 \\ 0 & 0 & KGT \end{bmatrix}.$$
 (1)

Формальный учёт особенностей зацепления при соприкосновении заключался в поиске физически корректной функциональной зависимости упругих свойств несплошности от определяющих параметров взаимодействующих поверхностей, образованных на множестве микроконтактов [2, 3]. В общем случае, предполагалось, что плоская граница двух упругих полупространств с параметрами: $\lambda 1$, $\lambda 2$, $\mu 1$, $\mu 2$ – коэффициенты Ламэ и $\rho 1$, $\rho 2$ – плотности, образована за счет совокупности взаимодействия выступов и впадин микрорельефа, как показано на рис. 1.

В декартовой системе координат (*x*, *y*, *z*), представленной на рис. 1, располагались два однородных, изотропных, линейно-упругих полупространства, имеющих плоскую границу раздела, соответствующую y=0. Упругая среда с параметрами: плотность – ρ 1, скорость продольных волн $c_{l1} = [(\lambda 1+2\cdot\mu 1)/\rho 1]^{1/2}$, скорость поперечных волн $c_{t1} = (\mu 1/\rho 1)^{1/2}$, занимала область *y* < 0, а упругая среда с аналогичными параметрами с индексом 2, занимала область *y* > 0.

При переходе к эквивалентной упорядоченной периодической структуре каждая отдельная область микроконтакта рассматривалась как механическая колебательная система с сосредоточенными параметрами, состоящая из соединенных цепочкой элементов массы и упругости.

В низкочастотном приближении: *b*, *d* << $min(\lambda 1, \lambda 2)$; а также $max(b^2/\lambda 1, b^2/\lambda 2) << d$ массовый компонент существенно уступает по величине упругому, из-за чего эквивалентное механическое сопротивление, приходящееся на единицу площади участка границы, для нормальных составляющих упругих смещений зависит, в основном, от эквивалентной жёсткости, определяемой по формуле:

$$KGN = \frac{(\lambda 1 + 2\mu 1)(\lambda 2 + 2\mu 2)c_{l1}c_{l2}}{(\lambda 1 + 2\mu 1)c_{l1} + (\lambda 2 + 2\mu 2)c_{l2}} \cdot \frac{2\pi(1 - \xi)}{\omega d^2 \xi}.$$
 (2)

Аналогичная величина, характеризующая передачу тангенциальных составляющих упругих смещений, определялась по формуле

$$KGT = \frac{\mu l \mu 2c_{t1} c_{t2}}{\mu l c_{t1} + \mu 2c_{t2}} \cdot \frac{2\pi (1 - \xi)}{\omega d^2 \xi}.$$
(3)



Рис. 1. Схема образования модели несплошности с множественными микроконтактами: а – фрагмент микрошлифа; б – замещающая натурная модель; в – периодическая эквивалентная структура; г – эквивалентный элемент массы; д – эквивалентный элемент упругости

В формулах (2, 3) величина $\xi = b^2/d^2$ – коэффициент перфорации, определяющий степень сплошности границы. Очевидно, что можно положить $\xi=1-n$, считая n – относительной площадью фактического касания, определяемой в теории трения [5].

Как следует из формул (2, 3) при $\xi \to 0$ *KGN* и *KGT* $\to \infty$, что соответствует сплошному контакту на границе, учитываемому классическими граничными условиями. При $\xi \to 1$, *KGN* и *KGT* $\to 0$, что обеспечивает формальный переход к условиям свободной границы.

На рис. 2 представлены результаты вычислений значений элементов матрицы контактной нормальной и тангенциальной жесткостей для частного случая контакта однородных материалов.

Полученные числовые значения, отложенные по оси ординат в логарифмическом масштабе, дают представление о масштабе привлекаемых для формирования граничных условий величин и пределах их изменения.



Рис. 2. Зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) жесткостей от коэффициента перфорации (ξ) границы твердых сред (сталь-сталь) на множестве микроконтактов: (—) – частота f=1,25 Мгц; (- -) – частота f=2,5 Мгц; d=0,5 мм

Видно, что для рассматриваемой границы жесткость в направлении нормали превосходит значение жесткости в тангенциальном направлении, что согласуется с интуитивными представлениями, не опровергаемыми теорией и множеством экспериментальных данных [2, 5].

Для включения в модель параметров шероховатости границ, например, *Rz*, необходимо принять во внимание параметры формы контактирующих микровыступов (рис. 3). Если предположить, что выступы имитируются поверхностями сферической формы (как показано на рис. 1), то в соответствие с рекомендациями [5], можно показать, что величина среднего расстояния между микровыступами может быть представлена как:

$$d = 2\sqrt{2RRz - (Rz)^2} , \qquad (4)$$

где *R* – радиус замещающего сферического микровыступа; *Rz* – величина шероховатости [5].



Рис. 3. Схема к определению параметров взаимного влияния неровностей (микроконтактов) при их взаимодействии

Общий вид зависимости среднего расстояния между микровыступами от параметра шероховатости R_z , при заданных значениях радиусов микросфер, представлен на рис. 3. Кроме того можно показать, что средний радиус площади контактного пятна $r \approx (2/3)\sqrt{2RR_z}$, откуда $d^2 - b^2 \approx 2\pi r^2$.

Подстановка (4) в (2, 3) дает в явном виде зависимости контактных жесткостей от параметров шероховатостей границы раздела, а их общий ход ясен из графиков на рис. 4.



Рис. 4. Примерный вид зависимостей среднего расстояния между микроконтактами от параметра шероховатости R_z при заданных значениях радиусов сферических микровыступов: (–) – R=0,5·10⁻³ м; (---) – R=1,0·10⁻³ м; (––) – R=1,5·10⁻³ м

Общий вид зависимостей контактных жесткостей от параметров модели и параметров шероховатости представлен на рис. 5.

Очевидным преимуществом такого подхода является возможность аналитического описания непрерывного перехода от свойств «сварного контакта» до свойств «свободной границы».



6)

Рис. 5. Зависимости: а – *KGN*-нормальной контактной жесткости; б – *KGT*тангенциальной контактной жесткости от коэффициента перфорации ξ , при заданных значениях параметра шероховатости: (–) – $Rz = 5 \cdot 10^{-6}$ м; (---) – $Rz = 20 \cdot 10^{-6}$ м; f = 1 МГц

При этом, например, для большинства металлов и мегагерцовых частот достаточно учитывать диапазон контактных модулей в пределах $10^{12} \div 10^{17} \text{ H/m}^3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лепендин, Л. Ф.** Акустика: учеб. пособие для втузов. / Л. Ф. Лепендин. – М. : Высш. школа, 1978. – 448 с.

2. Аббакумов, К. Е. Преломление упругих волн на плоской границе раздела с нарушенной адгезией твердых сред / К. Е. Аббакумов, А. В. Кириков, Р. Г. Львов / Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», сер. «Приборостроение и информационные технологии». – 2003. – Вып. 1. – С. 10–17.

3. Аббакумов, К. Е. Оценка акустических свойств тонких расслоений и однострочных неметаллических включений в стальных листах / К. Е. Аббакумов, А. С. Голубев // Дефектоскопия. – 1982. – № 9. – С. 22–24.

4. Schoenberg, M. Elastic waves behavior acrouss linear slip interfaces / M. Schoenberg // J. Acoust. Soc. Amer. – 1980, Vol. $65. - N_{\odot} 5. - P. 1516-1521.$

5. Справочник по триботехнике: в 3 т. / Под общ. ред. М. Хебды. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 1. Теоретические основы. – С. 56–58.

E-mail: KEAbbakumov@etu.ru

УДК 669.1/8.017.16 ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛОГРАФИИ В БЕЛАРУСИ

А. Г. АНИСОВИЧ

ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 669.1/8.017.16 PROBLEMS OF METALLOGRAPHY PROGRESS IN BELARUIS A. G. ANISOVICH

Аннотация

Рассмотрены вопросы развития металлографического анализа в Беларуси. Проблемами в данной области исследований являются: устаревшая материальная база, отсутствия современной справочной литературы, недостаток специалистов и их неудовлетворительная квалификация, отсутствие системы повышения квалификации специалистов-металловедов, низкое качество подготовки студентов по данной специальности, устаревшие стандарты на структуру металлов и металлопродукцию.

Ключевые слова:

металлография, повышение квалификации, стандартизация, литература по металлографии

Abstract

The problems of metallographic study development in Belarus are considered. The problems are: outdated resource base, lack of modern reference literature, deficiency of specialists and their pour professional skills, the absence of professional development systems of specialists, poor quality of students training in metallography, outdated material standards.

Key words:

metallography, advanced training, standardization, metallography literature.

Металлография является начальным этапом исследования металлов и сплавов, а, в настоящее время, также и любых материалов методами оптической и растровой микроскопии.

Современная металлография – это комплекс качественных и количественных методов анализа структуры металлических материалов, использующих современное металлографическое оборудование, средства компьютерной техники и математической обработки экспериментальных данных [1]. Актуальность металлографического анализа состоит в том, что внутреннее строение металлов, сплавов и материалов является одним из основных факторов, определяющих физико-химические и эксплуатационные свойства изделий.

В белорусской металлографии накопился ряд проблем.

Наиболее значительной среди них является устаревшая материальная база металлографических исследований. Частично заводские, а практиче-

ски и все учебные лаборатории ВУЗов оснащены оборудованием 60–70-х годов прошлого века. Приобретение оборудования для металлографии в Беларуси затрудняется отсутствием средств для обновления материальнотехнической базы научных исследований и, в этой связи, отсутствием у специалистов сведений о возможностях металлографического оборудования.

В настоящее время металлографические исследования осуществляются на сложных комплексах, включающих микроскоп, видеокамеру, компьютер с программами управления видеокамерой и обработки изображений. Комплектация их не всегда удачна, поскольку нет достаточного взаимопонимания между производителями и потребителями. Как правило, потребитель не знаком с камерами, программами управления видеокамерой и обработки изображений, и считает, что программа обработки изображений «автоматически» анализирует структуру. Как правило, представители торговых фирм, а также и производители не знают, что требуется металловеду, поскольку не представляют себе специфику объектов исследования. Покупатель не знает специфику предлагаемого оборудования. Отсюда ошибки в комплектации сложных комплексов анализа структуры.

Серьезной проблемой является недостаток квалифицированных специалистов. Среди причин данного явления – низкая оплата труда, и, с одной стороны, невостребованность высококвалифицированных специалистов в связи с сокращением как производства, так и научных центров. С другой – нехватка специалистов периферийных производств. В настоящее время есть тенденция комплектования кадров металлографических лабораторий людьми, без специального образования. Нет наставников, т.к. возраст специалистов советской формации предельный. Это следствие развала последних 25 лет, когда стало невозможно свободное перемещение специалистов по причине, хотя бы, отсутствия жилья (в СССР эта проблема была, но хоть как-то решалась). Кроме того, на заводах люди просто не имеют возможности расти из-за отсутствия времени, однообразия объектов анализа, а также из-за полного прекращения исследовательской работы на производстве. В Беларуси отсутствует серьезная система повышения квалификации в области металлографии. Существуют проблемы с обучением студентов: недостатки в материальной базе, ограниченность времени на учебный процесс. Следствие этих проблем - снижение уровня специалистов, а также предельное повышение возраста работающих.

В настоящее время объекты материаловедческого исследования чрезвычайно разнообразны. Созданы целые классы новых материалов, которые требуют развития методов анализа структуры. Это самые разнообразные композиты, биметаллы, керамика, полимеры и пр., а также биологические объекты, которые традиционно исследуются в проходящем свете. Для их анализа возможно использование современного металлографического оборудования методом съемки «на отражение». Именно для новых сложных материалов в наибольшей степени применяются дополнительные опции металлографического микроскопа, расширяющие возможности оптического контрастирования [1–3]. Современные металлографические микроскопы имеют достаточно возможностей для контрастирования изображения объекта. Чаще всего это разнообразные методы освещения. В современной металлографии широко используются методы контрастирования [2, 4], среди которых:

– диафрагмирование при анализе в светлом поле (светлопольная микроскопия;

- освещение полым конусом света («темнопольная микроскопия»);

- освещение цветным («хроматическим») светом;

 освещение поляризованным светом (визуализируется изменение поляризации света при взаимодействии с объектом);

– нтерференционное контрастирование объекта.

Взаимодействие этих методов в одном исследовании позволяет установить характер наблюдаемых оптических эффектов на поверхности металлов и неметаллических материалов и сделать определенное заключение о причинах их возникновения. В данном направлении также ощущается недостаток информации. Проблемой является отсутствие литературы, соответствующей современному уровню развития металлографии, в первую очередь, атласов микроструктур. На рынке присутствует недавно изданная литература по микроскопии, снабженная некоторым количеством иллюстраций, которые не могут представлять интереса именно для металловедов [3, 5]. Есть литература по металлографии, которая написана давно, например [6, 7]. При всем том, что данные знания актуальны и сейчас, изменилось оборудование, изображения структур выглядят по-другому, да и сами микроскопы конструктивно претерпели изменения. Также нет современной литературы для начинающих. Отдельным вопросом следует выделить литературу, посвященную методам количественного анализа изображений в металлографии. Этот вопрос представляется практически выпавшим из рассмотрения специалистами. Проблематично также взаимопонимания между специалистами по обработке изображений и металловедами. Зачастую у металловедов отсутствует информация о возможностях количественного анализа структуры с применением методов компьютерной обработки, соответственно, отсутствует опыт работы в программах обработки изображений.

Аксиомой является то, что качество металлических изделий любого назначения обеспечивается, в первую очередь, качеством металла. Соответствие металлических изделий требуемому уровню качества задается соответствующими ГОСТами, среди требований которых: состав по основным легирующим элементам и примесям, термическая (или иная) обработка, а также набор требований к структуре, которая и обусловливает, в конечном итоге, качество полуфабрикатов или изделий. В настоящее время на территории Беларуси, в основном, действуют ГОСТы на металлопродукцию, разработанные еще в советские времена. Необходимо совершенствование правовой базы, выработка новых стандартов, соответствующих современному уровню развития технологий.

Рассмотрим металлографию в Интернете. Интернет к настоящему моменту прочно вошел в нашу жизнь. Мы не можем игнорировать тот факт,

что студенты (да и многие специалисты) пользуются им для получения, в том числе и справочных сведений. Следует принять, что Интернет в настоящее время выполняет роль образовательной базы хотя бы уже тем, что там можно найти всю классику металловедческой литературы. Методы оптической микроскопии в Интернете (в русскоязычной его части) представлены на сайтах, посвященных, в основном, пробоподготовке, а также металлографическому оборудованию. В части этих двух направлений сведения в Интернете исчерпывающие. Обнаруживается явный недостаток современных сведений о металлографии, в том числе о способах и методах получения изображения структур разнообразных материалов, в противоположность сведениям биологического направления. При поиске, например, по запросу «темнопольная микроскопия» можно найти много данных, относящихся к биологии и медицине, но не к металлографии. Очень мало представлено изображений реальных структур металлов (не говоря уже о неметаллических материалах), полученных с помощью разнообразных методик металлографического анализа. Основная масса структур материалов (металлов), представленных в Интернете, – это копии из книг, изданных достаточно давно, когда структурные исследования проводили, в лучшем случае, на микроскопах марки «Neophot». Относительно современного уровня металлографических исследований качество таких изображений невысоко. В отдельных случаях на таких изображениях невозможно вообще что-либо разобрать, или же они дают неверную информацию. Сайтов, предоставляющих современную информацию в области материаловедения, немного [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисович, А. Г. Практика металлографического исследования материалов / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 221 с.

2. Анисович, А. Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А. Г. Анисович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.

3. **Кларк, Э. Р.** Микроскопические методы исследования материалов / Э. Р. Кларк, К. Н. Эберхардт. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.

4. Металлография // Structure.by [Электроный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://www. structure.by. Дата доступа: 12.08.16.

5. Егорова, О. В. Техническая микроскопия. С микроскопом на «ты» / О. В. Егорова. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.

6. **Червяков, А. Н.** Металлографическое определение включений в стали / А. Н. Червяков, С. А. Киселева, А. Г. Рыльникова. – М. : ГНТИ лит. по черной и цветной металлургии, 1962. – 248 с.

7. Лаборатория металлографии / Е. В. Панченкои [и др.]; под ред. Б. Г. Лившица. – М. : Металлургия, 1965. – 440 с.

E-mail: <u>anna-anisovich@yandex.ru</u>

УДК 620.179.16 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НЕОДНОРОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

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

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» *Белорусский национальный технический университет **ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Минск, Могилев; Беларусь

UDC 620.179.16 MODELING OF REFLECTION OF VOLUME AND SURFACE WAVES BY AN INHOMOGENEOUS BONDERY A. R. BAEV, A. L. MAYOROV, V. V. ZAKHARENKO, O. S. SERGEYEVA

Аннотация

Проведено экспериментальное и численное исследование отражения объемных и поверхностных волн с неоднородной границей, что представляет интерес для ультразвукового контроля объектов сложного профиля, малых габаритов и со слоистой структурой. Предложена методика моделирования фазового сдвига волн и развит метод контроля качества сцепления материалов, основанный на оптимизации апертур и фаз мнимых источников упругих волн (УВ), отраженных неоднородной границей, позволяющий существенно повысить чувствительность выявления дефектов со слабой отражающей способностью путем приема рассеянной волны под углами минимумов 1-го и 2-го порядка поля опорного (мнимого) акустического пучка. Изучены особенности отражения, трансформации поверхностных акустических волн (ПАВ) и их прохождения через акустическую нагрузку, создаваемую твердым телом различной геометрии через скользящий контакт с образцом. Впервые получены зависимости коэффициентов отражения волны Стоунли К_{st} от угла наклона боковой грани $-60^{\circ} \ge \alpha \le 60^{\circ}$ отражателя звука (ОЗ), что представляет интерес для разработки ультразвуковых устройств контроля свойств поверхности и выявления дефектов.

Ключевые слова:

диаграмма направленности, поверхностная акустическая волна, волна Стоунли, отражатель звука, сцепление материалов.

Annotation

An experimental and numerical investigation of the reflection of volume and surface waves by an inhomogeneous boundary is performed, which is of interest for ultrasonic testing of objects of a complicated profile, small dimensions, and with a layered structure. A technique for modeling the phase shift of waves is suggested and a method for controlling the quality of the adhesion of materials is developed, which is based on the optimization of the apertures and phases of imaginary sources of elastic waves (EW) reflected by an inhomogeneous boundary, which makes it possible to significantly increase the detection sensitivity of defects with a weak reflectivity by receiving a scattered wave at an angle of the minima of the first and of the second order of the field of the reference (imaginary) acoustic beam. The features of reflection, transformation of surface acoustic waves (SAWs) and their passage through acoustic loading, created by a solid body of various geometry and sliding contact with the sample, are studied. Dependences of Stonely's reflection coefficients K_{St} on the slope angle - $60^{\circ} \ge \alpha \le 60^{\circ}$ of the sound reflector (SR) were obtained for the first time, which is of interest for the development of ultrasonic devices for monitoring surface properties and detecting defects.

Key words:

directional pattern, surface acoustic wave, Stonely wave, sound reflector, material adhesion.

При проведении ультразвукового контроля объектов сложного профиля, малых габаритов, а также имеющих слоистую структуру, возникает ряд прикладных задач по оптимизации методик и средств измерений, позволяющих повысить их производительность и надежность без значительных затрат. В частности, это касается возможности использования особенностей формирования поля ультразвуковых волн (УВ), одновременно отраженных от участков контролируемого объекта, коэффициенты отражения которых отличаются как по абсолютной величине, так и по фазе; поверхностных акустических волн (ПАВ) отраженных от акустической нагрузки, создаваемой твердым телом различной геометрии, в контактном зазоре которого распространяются волны Стоунли [1].

Отражение УВ неоднородной границей

Несмотря на важность проблемы контроля качества сцепления различных неразъемных соединений типа металл-металл, металл-неметалл, полимер-полимер, известные методы, изложенные в [2], недостаточно надежны, либо громоздки и сложны в эксплуатации. Учитывая особенности дифракции рассеянных неоднородной границей волн, был предложен метод оптимизации апертур и фаз мнимых источников УВ [3], развитый в работе [4], позволяющий существенно повысить как чувствительность, так и производительность ультразвукового контроля. В общем случае результирующее акустическое поле при отражении УВ от границы сцепления материалов (разделенной на i_0 участков) представляется в виде суперпозиции полей i_0 источников

$$F_i \sim \int_{S_i} \chi_i(\theta) \exp(-jk_R r_{BM}) \frac{1}{r_{BM}} dS_i$$

где $\chi_i(\theta)$ – функция направленности элементарного источника; k_R – волновой вектор; r_{BM} – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения.

Сначала предполагалось, что количество участков, одновременно отражающих УВ, два (дефектный и бездефектный), а различие фаз между отраженными от них волнами близко к $\Delta \phi \rightarrow \pi$. Именно в этом случае при приеме волны под углом отражения $\theta \rightarrow \beta$ и характерном положении сканирующего преобразователя (ПЭП), где β – угол падения волны, при выявлении дефектов наблюдалось изменение амплитуды опорного сигнала A_0

на порядок и более. При моделировании процесса отражения ПАВ обнаружена принципиальная возможность достижения такой же чувствительности при выявлении дефектов и в том случае, когда имеется отличие $\Delta \phi$ от π . Дальнейшему развитию этой идеи и посвящена первая часть настоящей работы, в которой численно и экспериментально моделировались такие условия, при которых величина $\Delta \phi$, для используемых УВ, была значительно меньше π , а изменение амплитуды при сканировании объекта было бы достаточным для выявления слабоотражающих звук локальных дефектов, включая дефекты слипания.

В настоящей работе для моделирования формирования полей мнимых источников УВ, одновременно отраженных от неоднородной границы, в качестве объекта исследований использовался преимущественно стальной образец в виде параллелепипеда (рис. 1), отражающая поверхность которого выполнена ступенчатой формы с характерной высотой ступенек $\delta_i \ll \lambda$, при которых фазовый сдвиг волн, отраженных от поверхностей смежных участков $\Delta \phi_i \approx 2\pi f \delta_i / \cos \beta$, где λ – длина волны заданной упругой моды.



Рис. 1. Предложенная форма стального образца в виде параллелепипеда с отражающей поверхностью ступенчатой формы для моделирования процессов формирования акустического поля, отраженных от этой поверхности волн со сдвигом фаз $\Delta \varphi$

При проведении экспериментальных исследований в режиме эхо, объемные волны и ПАВ отражаются и принимаются одним и тем же преобразователем, либо дополнительным – установленным под заданным углом приема волн θ' . Для проведения экспериментальных исследований использовалась аппаратура приведенная в работе [3]. Некоторые результаты численных и экспериментальных данных, находящиеся в хорошем качественном соответствии, приведены на рис. 2 и 3.

Как обнаружено, установка угла приема ПЭП упругих волн, рассеянных неоднородной границей θ' , в положение, соответствующее минимумам или максимумам первого порядка $\theta' = \theta_{\pm}$ (которых два) поля мнимого источника. Опорного сила может приводить к существенному изменению амплитуды сигнала как объемной, так и поверхностной волны, достигающей10 дБ и более, даже при $\Delta \varphi \sim \pi/18$, в процессе пересечения акустическим пучком модельной границы.



Рис. 2. Зависимость амплитуды рассеянной волны от положения координаты дефекта *x* относительно пятна АП на характер изменения поля мнимых источников при поперечном размере дефекта l_D /=1/3, где – размер пятна АП; безразмерный параметр $x_l/2a$: $\Delta \varphi = \pi(1, 4)$; $\pi/2$ (2, 5); $\pi/8$ (3, 6); 1–3 – углы минимума первого порядка; 4–6 – углы минимума второго порядка



Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды рассеянных волн Рэлея модельной границей (рис. 1), в зависимости от положения ПЭП и сдвиге фаз между отраженными волн $\Delta \phi \approx 0,5\pi$ при f = 5 МГц: угол приема рассеянных ПАВ на контактную поверхность $\theta' = 0^{\circ}(1)$; 5° (2); 7° (3, 4); 1–3 – расчетные данные; 4 – данные эксперимента (•)

Анализ полученных данных показывает эффективность использования рассмотренного метода для выявления слабоотражающих звук дефектов сцепления материалов, которые в значительном числе случаев являются потенциально опасными. Причем одной из важнейших характеристик качества сцепления материалов (включая степень взаимной диффузии контактирующих материалов) является именно фазовая характеристика $\Delta \varphi$, определение которой традиционными способами существенно затруднено в реальных условиях ультразвукового контроля и зависит от качества акустического контакта, формы зондирующего сигнала, микро- и макрогеометрии поверхности.

Также получены численные зависимости (аксиальное приближение) амплитудных параметров полей рассеяния ДН для условий сканирования вдоль оси хобъекта акустическим пучком (АП) круглого сечения площадью S_A при наличии круглого дефекта радиусом r_0 и площадью S_0 , центр которого расположен под различным углом ψ по отношению к оси x на расстоянии r от центра акустической оси.

Как установлено, при $\Delta \phi \rightarrow \pm \pi$ поле рассеяния АП в каждой плоскости сечения $\psi = const$ является симметричным относительно оси ДН независимо от положения дефекта, находящегося в области пятна АП. При
этом, если $\theta = \theta_0 = const$, то $\Phi(\theta_0, \psi)$ является анизотропной функцией. Интересно, что если дефект находится на оси x ($\psi = 0, \pi$), то поле рассеяния в плоскости $\psi = \pi/2$ совпадает с полем дефекта, центр которого совпадает с координатой {x, y, z}=0. В случае, когда $\Delta \varphi \neq \{0, \pm \pi\}$, то указанные свойства симметрия ДН отсутствуют. Как показывают численные расчеты, последняя претерпевает значительные изменения при наличии формы дефекта, существенно отличной от круговой, а также при фазовом сдвиге, лежащем в диапазоне $\Delta \varphi = |\pm \pi|$.

Отражение ПАВ от акустической (скользящей) нагрузки, создаваемой контактом твердых тел

Изучение этих вопросов представляет значительный интерес в плане разработки новых методов и средств контроля физико-механических свойств поверхностных слоев твердых тел, а также контроля дефектности сопряженных трущихся пар на наличие поверхностных дефектов и является развитием исследований работы [5]. Экспериментально изучены особенности отражения и прохождения ПАВ (первоначально возбуждаемой волны Рэлея) через область, создаваемую твердотельным отражателем звука (O3) с различной геометрией угла наклона его боковых граней (рис. 4) и его поворота относительно направления прозвучивания. Некоторые новые результаты исследований, важные для практики, приведены на рис. 5.



Рис. 4. Схемы экспериментального исследования прохождения и трансформации ПАВ с использованием контактных ОЗ различной формы: 1,2 – ПЭП; 3 – ОЗ; 4 – объект контроля; 5 – боковые грани; α – угол наклона боковых граней

Проведенный анализ акустического тракта в эхо и теневом режимах показывает, что амплитуда прямой проходящей волны (A_{pr1}) , претерпевшей двойное отражение волны Стоунли в контактном слое и трансформированной из волны Рэлея (A_{pr2}) , волны Рэлея, отраженной от передней грани ОЗ (A_{ref1}) и ПАВ, отраженной от задней грани ОЗ (A_{ref2}) , связаны следующими соотношениями:

$$\begin{array}{ll} A_{ref1} \sim K_{R}, & A_{ref2} \sim D_{R,St} K_{St2} D_{St,R}, \\ A_{pr1} \sim D_{R,St} D_{St,R}, & A_{pr2} \sim D_{R,St} K_{St2} K_{St1} D_{St,R}, \end{array}$$

где $D_{R,St}$ и $D_{St,R}$ – коэффициенты прохождения ПАВ через переднюю и заднюю границы ОЗ; K_{St2} и K_{St1} – коэффициенты отражения волны Стоунли от задней и передней границы ОЗ соответственно; K_R – коэффициент отражения ПАВ от передней границы ОЗ; $K_0 = D_{R,St}K_{St2}D_{St,R}$ – характеризует амплитуду ПАВ на приемном преобразователе, отраженной от задней границы ОЗ.

Необходимо отметить, что коэффициенты отражения (или амплитуды отраженных сигналов) являются функциями угла наклона α боковых граней ОЗ к контактной поверхности. Исходя из экспериментальных данных и приведенных выше соотношений, впервые получены зависимости коэффициента отражения волны Стоунли K_{St}, а также соотношения амплитуд отраженной ПАВ от задней и передней границы ОЗ в зависимости от угла наклона передней грани, что весьма важно при проектировании малогабаритных ультразвуковых устройств для получения амплитудно-угловых характеристик и измерения скорости поверхностной волны, коррелирующих с физико-механическими свойствами поверхностного слоя металлоизделий [6].



Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения волны Стоунли К_{st} от угла наклона боковой грани O3(1) и отношения амплитуды отраженной ПАВ от задней и передней границы O3 в зависимости от угла наклона передней грани (2)

Как видно, коэффициент отражения волны Стоунли К_{St} является монотонно убывающей функцией от абсолютной величины угла наклона боковых граней ОЗ. Причем его величина в исследованном диапазоне $|\alpha| < 0^{\circ} - 60^{\circ}$ изменяется практически в 2 раза. А в случае, когда угол наклона задней боковой грани $\alpha = 0$, варьирование наклона передней боковой грани в указанном диапазоне вызывает увеличение отношения амплитуд $A_{21}=A_2/A_1$, не превышающее 10–20 %, причем $A_{21}\approx 0,1$ при $\alpha = 0$.

Что касается коэффициента прямого прохождения ПАВ между излучателем и приемником ПЭП то его величина уменьшается не более чем в 2–3 раза в указанном угловом диапазоне. 1. **Stoneley, R.** Elastic waves at the surface of separation of two solids / R. Stoneley. – Proc. Roy. Soc. London, 1894. – P. 46–429.

2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клю-ева. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.

3. Баев, А. Р. Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями. Ч. 1. Результаты экспериментальных исследований / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 3–17.

4. Рассеяние ультразвуковых колебаний на неоднородной границе при контроле неразъемных соединений / А. Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 25–38.

5. Создание опорного сигнала при ультразвуковых измерениях / А. Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2013. – № 1. – С. 42–55.

6. Пат. 9911 РБ, МПК G 01 N 29/04. Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн / А. Р. Баев, О. С. Сергеева, М. В. Асадчая, М. А. Тищенко ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № и 20130571 ; заявл. 08.07.13 ; опубл. 28.02.14 // Открытия. Изобретения. – 2014. – 4 с.

УДК 621.385

ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДООРТОГОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ И СПЛИТ-СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК

Е. Г. БАЗУЛИН, В. К. АВАГЯН

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Москва, Россия

UDC 621.385

APPLICATION OF PSEUDOORTOGONAL SIGNALS AND SPLIT-SIGNALS FOR INCREASING THE SPEED OF ECHOSIGNAL REGISTRATION BY ANTENNA ARRAYS E. G. BAZULIN, V. K. AVAGYAN

Аннотация

В статье рассматривается метод ускорения регистрации эхосигналов антенной решёткой для восстановления изображения отражателей методом цифровой фокусировки антенной. При регистрации эхосигналов предлагается одновременно излучать всеми элементами антенной решётки псевдоортогональные сигналы (или сплит-сигналы) по технологии, применяемой в технике многоканальной связи CDMA (Code Division Multiple Access). После декодирования принятых эхосигналов, изображение отражателей восстанавливается методом комбинированного SAFT (C-SAFT). Представлены результаты численных экспериментов по восстановлению изображения точечного отражателя для оценки уровня шума межканальных помех.

Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, CDMA, антенная решетка (AP), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), режим двойного сканирования, псевдослучайные сигналы, сплит-сигналы.

Abstract

The article considers the method of accelerating the registration of echoes by an antenna array for image reconstruction of reflectors by the method of antenna digital focusing. When registering echoes, it is proposed to radiate pseudo-orthagonal signals (or split-signals) by all the antenna array elements simultaneously using technology used in CDMA (Code Division Multiple Access) technology. After decoding the received echoes, the image of the reflectors is restored using the combined SAFT (C-SAFT) method. The results of numerical experiments on image reconstruction of a point reflector for estimating the noise level of interchannel interference are presented.

Key words:

ultrasonic testing, CDMA, antenna array, antenna digital focusing, dual scanning mode, pseudo-random signals, split-signals.

В настоящее время в практике ультразвукового контроля широко применяются дефектоскопы, использующие антенные решётки (АР). Метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [1] позволяет визуализировать внутренний объем объектов контроля. На первом этапе применения ЦФА-технологии эхосигналы измеряются при излучении и приёме всеми комбинациями пар элементов АР [2]. На втором этапе изображение отражателей по измеренным эхосигналам восстанавливается методом комбинированного SAFT (C-SAFT) [2, 3], который можно модифицировать для учёта многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами и наличием областей с разными акустическими свойствами [4]. Недостатком регистрации эхосигналов методом двойного сканирования является большой объем измеренных данных – при увеличении количества элементов AP N_e объём зарегистрированных эхосигналов растёт квадратично. Это приводит к увеличению времени регистрации эхосигналов, что может оказаться критичным при проведении контроля на ряде объектов. Поэтому задача повышения скорости регистрации эхосигналов и уменьшения их объема весьма актуальна как для ультразвукового контроля, так и для медицинской ультразвуковой диагностики.

Для уменьшения времени регистрации эхосигналов AP, работающих в режиме двойного сканирования, можно отказаться от последовательного излучения импульсов элементами AP и излучать одновременно всеми элементами AP псевдоортогональные сигналы, сформированные на основе кодовых наборов кодирующих сигналов (коды Касами, де Брейна, Задова-Чу, Велти и пр.) [5], которые широко используются в технике многоканальной связи CDMA (Code Division Multiple Access). Кодовый набор характеризуется длиной сигнала или кода N_e (числом чипов), числом сигналов в наборе N_k . Количество кодовых наборов N_p определяет мощность последовательности. На основе кодовых наборов генерируется фазоманипулированные зондирующие сигналы $s_n(t)$ для возбуждения элементов AP. Корреляционная функция $R_{nm}(\tau)$ такого набора сигналов $s_n(t)$ должна обладать следующим свойством:

$$R_{nm}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_n(t) s_m(t+\tau) dt \approx \delta_{nm} \delta(\tau), \quad n, m = 1, 2, \dots N_e,$$
(1)

где δ_{nm} – символ Кронекера.

Регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования происходит следующим образом. Пусть AP имеет четыре элемента $N_e=4$, каждому из которых на рис. 1 приписан свой цвет, соответствующий кодовому сигналу $s_n(t)$. Сначала излучает первый элемент AP и эхосигналы (показаны прямоугольниками розового цвета) регистрируются всеми элементами AP (выстрел номер один 1—1:4). Затем излучает второй элемент AP с приёмом эхосигналов (прямоугольники голубого цвета) всеми элементами AP. Так продолжается пока не излучат все 4 элемента. За четыре такта произойдет измерение $N_e^2 = 16$ эхосигналов $p_{nm}(t)$. В режиме двойного сканирования каждый элемент AP возбуждается одним и тем же зондирующим сигналом s(t). В правой части рис. 1 представлен результат регистрации эхосигналов в режиме CDMA, когда каждый элемент AP излучает свой уникальный зондирующий сигнал $s_n(t)$, а эхосигналы $p_m(t)$ одновременно принимаются всеми элементами AP.

Для восстановления изображения методом C-SAFT эхосигналы $p_m(t)$ нужно декодировать, чтобы *m*-ый абонент мог выделить сообщение $p_{nm}(t)$ от абонента с номером *n*. То есть получить эхосигналы, так как будто они были измерены в режиме двойного сканирования. Такой подход позволяет вместо 4-ёх измерений провести только одно, а количество эхосигналов сократить до N_e. Чем больше число элементов AP, тем больше выигрыш в скорости измерений эхосигналов в сравнении с режимом двойного сканирования. Декодирование эхосигналов $p_m(t)$ позволяет каждому *m*-ому абоненту выделить свой сигнал из суммарного сигнала (рис. 1) благодаря свойству псевдоортогональности (1) сигналов $s_n(t)$. Распространённым методом декодирования является сжатие сложных сигналов $p_m(t)$ с помощью согласованной фильтрации с кодовым сигналом $s_n(t)$. Такой алгоритм сжатия сложных сигналов обладает высоким быстродействием и позволяет получать изображения с частотой более 10 Гц, но он не позволяет получить низкий уровень межканальных помех. Более сложный метод декодирования или деконволюции простых или сложных сигналов, позволяющий уменьшить уровень межканальных помех и уменьшить длительность эхосигналов, основан на использовании метода максимальной энтропии (МЭ) [6]. Такой способ декодирования позволяет получить оценку эхосигнала со сверхразрешением и с низким уровнем шума.



Рис. 1. Повышение скорости регистрации эхосигналов

В качестве набора псевдоортогональных кодов были рассмотрены следующие кодовые последовательности: Касами, Задова-Чу, Велти, а так же последовательности случайных фаз с равномерным распределением в интервале [- π , π]. При генерации зондирующих сигналов полагалось, что несущая частота каждого чипа равномерно случайным образом меняется в заданном частотном диапазоне ($f_c - \Delta f$, $f_c - \Delta f$), где f_c – центральная частота АР. Изменение несущей частоты используется в технологии FDMA (Frequency Division Multiple Access). В ходе моделирования было обнаружено, что уровень межканальных помех при $\Delta f \approx f_c/2$ для упомянутых выше сигналов соизмерим. Уровень межканальных помех обычно оценивается как $1/\sqrt{N_c}$. Чтобы он был порядка -20 дБ, длина последовательности должна быть не меньше $N_e \approx 100$.

Частотно-модулированные сигналы не подошли по причине высокого уровня межканальных помех для случая 32 элементных АР и сигналов с шириной полосы пропускания, соизмеримой с рабочей частотой.

Однако увеличение длины кодовой последовательности N_c приводит к невозможности проведения контроля тонкостенных объектов. Использование сплит-сигналов [7], то есть излучение M разных сигналов, которые после приёма обрабатываются совместно, позволит уменьшить в M раз длину последовательности с сохранением уровня межканальных помех. При этом вместо того, чтобы излучить один раз набор кодовых последовательностей длиной 100, можно 10 раз излучить сигналы длиной 10. Но скорость регистрации эхосигналов уменьшится в *M* раз.

Эффективность предложенного метода ускорения регистрации эхосигналов была оценена в численном эксперименте. Для этого были рассчитаны эхосигналы, рассеянные точечным отражателем с координатами (0,30) мм в однородной изотропной среде с использованием AP (без призмы), центр которой расположен в точке (0,0) мм. AP состояла из 32 элементов с шагом 0,5 мм. На рис. 2 представлено изображение отражателя, восстановленное методом C-SAFT по эхосигналам, рассчитанным для режима двойного сканирования при использовании Гауссоподобного сигнала s(t) длиной два периода несущей частоты, равной 5 МГц. Отношение сигнал/шум изображения (SNR) далее будет оцениваться как отношение амплитуды главного максимума изображения к амплитуде второго локального максимума. SNR изображения на рис. 2 равно 33 дБ.



Рис. 2. Изображение, восстановленное по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования

Задачу повышения скорости регистрации эхосигналов предложенным способом будем считать решённой, если удастся получить изображение с SNR более 20 дБ и, при этом более чем в 8 раз, повысить скорость регистрации по отношению к режиму двойного сканирования. Численное моделирование для всех упомянутых выше кодовых последовательностей показало, что для $f_c=5$ и $\Delta f=2$ МГц изображения точечного отражателя отличается не принципиально для соизмеримых N_e . Так как N_c и N_k для ПСФ можно выбирать любыми, то им и было отдано предпочтение.

На рис. 3 показаны изображения точечного отражателя при использовании ПСФ с N_c =63. На рис. 3 слева – при декодировании $p_m(t)$ согласованной фильтрацией (SNR=11,8 дБ), а справа – при декодировании методом МЭ (SNR=17,5 дБ). Продольная разрешающая способность МЭ-изображения в два раза выше, чем у СФ-изображения. Однако, для обоих изображений SNR меньше 20 дБ. Повышение частоты сигналов после декодирования методом МЭ привело к повышению уровня шума МЭ-изображения из-за грубого шага между центрами элементов АР.



Рис. 3. Изображение точечного отражателя при использовании последовательностей со случайной фазой длины $N_e = 63$

На рис. 4 приведены аналогичные изображения, но при использовании сплит-сигналов ($N_c=15$, M=4, $N_cM=60$). На Рис. 4 слева – СФ-изображение (SNR=14,7 дБ), а справа – МЭ-изображение (SNR=20,6 дБ). Только МЭ-изображение имеет требуемое значение SNR.



Рис. 4. Изображение точечного отражателя при использовании сплитсигналов (N_c=15, M=4, N_cM=60)

Важная особенность метода C-SAFT заключается в том, что изображение можно получить при когерентной обработке эхосигналов, измеренных AP во N_w положениях в пространстве. Если для каждого положения приписать свою кодовую последовательность, то такой подход позволит дополнительно повысить отношение сигнал/шум в $\sqrt{N_w}$. Численное моделирование подтвердило эффективность такого подхода. Ещё один способ повышения SNR заключается в разбиении AP на две и более подрешёток и проведении измерений эхосигналов по рассматриваемой технологии всеми комбинациями подрешёток. Например, если AP из 32 элементов разбить на две AP из 16-и элементов, то нужно провести четыре измерения, то есть скорость регистрации уменьшится в четыре раза.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Для ускорения регистрации эхосигналов с помощью АР можно использовать последовательности со случайной фазой. Декодирование эхосигналов $p_m(t)$ можно проводить согласованной фильтрацией или методом МЭ. Декодирование методом МЭ даёт более низкий уровень межканальных помех по сравнению с декодированием согласованной фильтрацией, но скорость работы метода МЭ значительно меньше. Для уменьшения длины зондирующих сигналов $s_n(t)$ с целью контроля тонкостенных объектов можно воспользоваться сплит-сигналами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов / В. А. Воронков [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 1. – С. 64–70.

2. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция / А. В. Ковалев [и др.] // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С. 29–41.

3. 3D Ultrasonic Imaging by Cone Scans and Acoustic Antennas / I. Bolotina // 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16–20 April 2012. Durban. South Africa

4. Базулин, Е. Г. Восстановление изображения отражателей методом С-SAFT с учётом анизотропии материала объекта контроля / Е. Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2015. – № 4. – С. 42–52.

5. Базулин, Е. Г. Повышение скорости регистрации ультразвуковых эхосигналов для режима двойного сканирования / Е. Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – С. 27–44.

6. Базулин, А. Е. Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле / Е. Г. Базулин // Акуст. журн.. – 2009. – № 6. – С. 772–783.

7. **Качанов, В. К.** Ультразвуковая помехоустойчивая дефектоскопия / В. К. Качанов, В. Г. Карташев, И. В. Соколов. – М. : Издательский дом «МЭИ», 2007. – 280 с.

УДК 621.385

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ИЗОТРОПНОМ ОДНОРОДНОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ ДВУМЯ АНТЕННЫМИ РЕШЁТКАМИ

Е. Г. БАЗУЛИН, М. С. САДЫКОВ

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Москва, Россия

UDC 621.385

DETERMINATION OF LONGITUDINAL ULTRASOUND WAVE'S SPEED IN ISOTROPIC HOMOGENEOUS WELDED CONNECTION POINT USING ECHO SIGNALS MEASURED BY TWO ANTENNA GRIDS

E. G. BAZULIN, M. S. SADYKOV

Аннотация

Предложен метод определения скорости продольной ультразвуковой волны в однородном сварном соединении, основанный на сравнении измеренных и рассчитанных эхосигналов при использовании двух антенных решёток на призмах, работающих в режиме двойного сканирования. Перечислены основные параметры, влияющие на точность расчёта скорости волны в сварном соединении. Приведены результаты численных и модельных экспериментов по расчёту скорости волны в сварном соединении. С помощью разработанного алгоритма в модельном эксперименте удалось измерить скорость продольной волны с погрешностью менее 0,7 %.

Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, определение скорости звука, антенная решетка, сварное соединение, целевая функция.

Abstract

We proposed a method for determining the longitudinal ultrasonic wave's speed in homogeneous welded connection point based on comparison of measured and calculated echo signals using two antenna grids on prisms, operating in dual-scanning mode. The main parameters affecting the accuracy of calculating the wave speed in welded connection point are listed. The results of numerical and model experiments for calculating the wave speed in a welded connection point are presented. Using proposed algorithm in a model experiment it was possible to measure the longitudinal wave's speed with error of less than 0,7 %.

Key words:

ultrasound control, sound speed calculation, antenna grid, welded connection, objective function.

Один из способов решения задачи ультразвуковой дефектометрии заключается в получении высококачественного изображения отражателей, по которому можно определить тип несплошности и её размеры. Информация о типе отражателя и его размерах позволит принять решение о степени опасности для работы оборудования. Для восстановления изображения применяют метод цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) [2], который позволяет учитывать такие эффекты, как многократное отражение от неровных границ объекта контроля (ОК), трансформация типа волны при преломлении и отражении ультразвукового пучка. Но для эффективного применения метода ЦФА необходимо знать такие свойства ОК, как его толщина и скорость продольной или поперечной волны. В общем случае для эффективного применения метода ЦФА нужно знать акустические свойства и геометрию сварного соединения ОК.

В статье [2] для безэталонного определения скорости звука и толщины ОК предложен метод, который заключается в сравнении эхосигналов, измеренных двумя антенными решётками (AP), с оценкой эхосигналов, расчёт которых проводится при заданных значениях скорости продольной или поперечной волны и толщины объекта контроля. Решением задачи являются значения скорости звука и толщины, которые обеспечивают минимальную разницу между рассчитанными и измеренными эхосигналами. Использование двух AP на призмах обусловлено тем, что сварное соединение реального ОК может иметь валик усиления, что не позволит провести измерения только одной AP.

В практике УЗК часто встречаются ОК со сварным соединением, акустические свойства которого отличаются от акустических свойств основного металла ОК. Примером служат трубопроводы с композитными сварными соединениями, ультразвуковой контроль которых часто проводится на продольных волнах. Упомянутый выше безэталонный подход к определению толщины и скорости звука можно использовать для определения скорости звука в сварном соединении с известной геометрией.

На первом этапе процедуры измерения скорости звука в сварном соединении происходит регистрация эхосигналов. На рис. 1 показана схема измерения эхосигналов неоднородного ОК толщиной h. Скорость продольной, поперечной волны и плотность в призме обозначим как $\{c_{w,l}, c_{w,s}, \rho_w\}$, угол наклона β , скорость звука и плотность основного металла ОК обозначим как $\{c_l, c_s, \rho\}$, а в сварном соединении как $\{c_{v,l}, c_{v,s}, \rho_v\}$. Первый пьезоэлемент АР с N-стороны излучает импульс, а все пьезоэлементы АР с P-стороны регистрируют эхосигналы. После чего, излучает второй пьезоэлемент, а все пьезоэлементы АР с P-стороны измеряют эхосигналы и т.д. Такой режим регистрации эхосигналов с применением АР называется двойным сканированием.



Рис. 1. Схематическое изображение системы измерений эхосигналов неоднородного ОК

На втором этапе проводится расчёт эхосигналов $\hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; c_{v,l})$ при излучении из точки \mathbf{r}_t и приёме в точке \mathbf{r}_r , в котором скорость продольной волны $c_{v,l}$ учитывается как один из аргументов, для его сравнения с измеренными эхосигналами $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$. То значение скорости $c_{v,l}$, при котором отличие между измеренными и рассчитанными эхосигналами минимально, и будет являться решением задачи по определению скорости звука. Сильное влияние на эффективность метода оказывает вид целевой функции, по которой определяется степень близости $\hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; c_{v,l})$ к $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$. В данной работе целевая функция имела вид величины обратной функции корреляции:

$$D_{c}(v) = \frac{1}{\left| \iint p(\mathbf{r}_{t}, \mathbf{r}_{r}, t) \hat{p}^{*}(\mathbf{r}_{t}, \mathbf{r}_{r}, t; v) dt d\mathbf{r}_{t} d\mathbf{r}_{r} \right|},$$
(2)

где значок * означает операцию комплексного сопряжения, а $v = c_{v,l}$. В свою очередь, на вид целевой функции влияют такие параметры, как форма излучающего сигнала, операторный шум, угловая апертура антенной решетки, частота дискретизации сигнала и количество акустических схем, используемых при оценке набора эхосигналов. Под акустической схемой понимается описание траектории (список отрезков $\{r\}$ и скоростей звука $\{c\}$ на каждом отрезке) распространения луча в ОК.

Расчёт эхосигналов можно выполнить в приближении геометрической акустики [3]по следующей формуле

$$\hat{p}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t;\nu) = \sum_{\{as\}} A_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r})s(t-t_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r})),$$

$$\Gamma \exists \mathbf{r}_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r}) = \sum_{n=1}^{m+3} \frac{|\mathbf{r}_{n}|}{c_{n}}, A_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r}) = \frac{D_{wo}\left(\prod_{j=1}^{m+1} T_{j}\right)D_{ow}}{R(\{r\},\{c\})}.$$
(3)

v – список параметров, которые влияют на расчет оценки эхосигналов $\hat{p}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t;v)$; s(t) – вид излученного сигнала; $\{as\}$ – список используемых при оценке акустических схем; T_{j} – коэффициент отражения от границ ОК; $R(\{r\},\{c\})$ – функция расходимости лучей, определяющая амплитуду импульса; $t_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r})$ – время пробега импульса по траектории $\{r\}$; D_{wo} , D_{ow} – коэффициенты прохождения из призмы в ОК, и обратно из ОК в призму.

Для определения траектории $\{r\}$, необходимой для расчета поля на приёмнике по формуле (3), использовался метод трассировки. Для более точного расчета скорости звука в сварном соединении, необходимо, кроме зеркально отражённых от дна ОК лучей, учитывать источники излучения волн, возникающие в точках касания дна границы сварного соединения. В данной работе оптимизация происходит по скорости продольной волны $v = \{c_{v,l}\}$, но можно проводить оптимизацию и по поперечной волне $v = \{c_{v,s}\}$ или, например, по их комбинации $v = \{c_{v,l}, c_{v,s}\}$.

При работе с неоднородным ОК или с ОК с неровными границами нужно принимать во внимание эффект многолучевого распространения звука, который учитывается в формуле (2). На рис. 1 схематически показаны три возможных варианта распространения луча в ОК.

Для тестирования разработанного алгоритма использовались эхосигналы, рассчитанные в программе моделирования результатов ультразвукового контроля CIVA [4]. Расчётная модель представляла собой стальной параллелепипед толщиной 45 мм со сварным соединением, акустические свойства которого совпадают с акустическими свойствами алюминия (рис. 2).

Параметры модели были следующие: скорость продольной волны вне сварного соединения (справа и слева от сварного соединения) – 5,9 мм/мкс, скорость продольной волны в сварном соединении – 6,35 мм/мкс, расстояние между передними гранями призм – 70 мм. АР состоит из 32 элементов размерами 0,75 мм с зазором 0,25 мм; материал призмы оргстекло (скорость продольной и поперечной волн 2,68 и 1,32 мм/мкс, плотность 1,18 г/см³).



Рис. 2. Расчётная модель в программе CIVA

На рис. 3 показаны эхосигналы, рассчитанные в программе CIVA и по формуле (3) для двух комбинаций излучающего и принимающего элемента AP. Фазы эхосигналов совпадает с точностью менее одной десятой периода, а амплитуда с точностью менее 0,1 дБ. Следует отметить, что расчёт по формуле (3) не учитывает такого эффекта, как изменение формы эхосигнала s(t), при смещении от центральной оси призмы.



Рис. 3. Эхосигналы, рассчитанные программой CIVA (лини красного цвета) и по формуле (3) (линии чёрного цвета)

Так как целевая функция имеет локальные минимумы, а из-за эффектов дискретизации возникает цифровой шум, то задача поиска минимума целевой функции решалась для множества исходных точек. Из полученного набора решений выбирались, отстоящие от минимального значения целевой функциим менее чем на один процент, и выбранные значения скоростей усреднялись. Относительная погрешность проведённого таким образом расчёта равна 0,08 %, что позволяет сделать вывод об отсутствии в программе, реализующей данный метод, принципиальных ошибок.

Для проведения модельных экспериментов был изготовлен стенд, состоящий из двух стальных частей, имитирующих основной металл ОК, и сменных частей, имитирующих сварное соединение с акустическими свойствами дюралюминия, аустенитной стали и латуни (рис. 4). Для всех сменных частей были проведены эксперименты по определению скорости продольной волны в сварном соединении.



Рис. 4. Измерение эхосигналов для латунного имитатора сварного соединения

В табл. 1 приведены значения скорости продольной волны в имитаторе сварного соединения, рассчитанные по предложенному алгоритму и измеренные ультразвуковым толщиномером с точностью $\pm 0,5$ %. Достигнутая погрешность измерений оказалась менее 0,7 %.

Имитатор	Скорость волны,	Скорость волны,	Относительная
сварного	измеренная	рассчитанная по	погрешность
соединения	толщиномером,	алгоритму,	расчёта, %
	мм/мкс	мм/мкс	
Алюминий	6,38±0,032	6,36	-0,32
Аустенитная сталь	5,70±0,029	5,66	-0,63
Латунь	4,20±0,021	4,22	0,48

Табл. 1. Расчет погрешности работы предложенного алгоритма

На результат работы алгоритма определения скорости звука влияют такие параметры эксперимента, как толщина ОК, скорость звука основного металла, расстояние между призмами, расположение излучающей решетки относительно сварного соединения, геометрия сварного соединения. Эти параметры на практике могут оказаться известными с недостаточной точностью, что приведёт к ошибкам определения скорости продольной волны.

Подводя итоги, можно сказать, что предложенный алгоритм определения скорости продольной волны в сварном соединении ОК показал свою работоспособность в численных и модельных экспериментах. Погрешность измерения скорости звука в модельном эксперименте менее 0,7 %. В список параметров v, по которым происходит поиск минимума целевой функции (2), могут быть включены дополнительные параметры, например, скорость поперечных волн, толщина объекта контроля, расстояние между призмами и пр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов / В. А. Воронков [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 1 (51) – С. 64–70.

2. Базулин, Е. Г. Измерение скорости звука и толщины в плоскопараллельных объектах контроля с использованием двух антенных решёток / Е. Г. Базулин, Г. М. Исмаилов // Дефектоскопия. – 2013. – № 8. – С. 20–34.

3. **Кравцев, Ю. А.** Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцев, Ю. И. Орлов. – М. : Наука, 1980. – 304 с.

4. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <u>http://www.extende.com/</u> (дата обращения: 30.05.17)

E-mail: <u>bazulin@echoplus.ru</u> magomedrasul.sadykov@yandex.ru

УДК 620.179.14 ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. П. ГУСЕВ, Я. И.ШУКЕВИЧ, А. Л. ЛУКЬЯНОВ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620.179.14 **TWO-PARAMETER METHOD OF CONTROL OF REINFORCEMENT CONCRETE STRUCTURES** *A. P. GUSEV, Y. I. SHUKEVICH, A. L. LUKYANOV*

Аннотация

В статье выполнен расчет методом конечных элементов внутреннего магнитного поля в прутке арматуры, распределения его напряженности по оси прутка и измерение пространственного распределения напряженности поля вне прутка при намагничивании его неоднородным полем постоянного магнита. Показано, что преобладающей составляющей намагниченности прутка является продольная, которая характеризуется соосными противоположно направленными диполями. Обоснована возможность одновременного определения диаметра прутка и его расстояния до магнита по распределению напряженности магнитного поля рассеяния.

Ключевые слова:

железобетонные конструкции, магнитный метод контроля, компьютерное моделирование, пруток, распределение магнитного поля.

Abstract

The article presents the results of finite element method analysis of the intensity of the internal magnetic field in the armature bar, its distribution along the bar axis, and the measurements of the spatial distribution of the field strength outside the rod when it magnetized by a nonuniform field of a permanent magnet. It is shown that the predominant component of the magnetization of the rod is longitudinal, which is characterized by coaxial oppositely directed dipoles. The possibility of simultaneous determination of the diameter of the rod and its distance to the magnet from the distribution of the magnetic field strength of the scattering is substantiated.

Key words:

reinforced concrete construction, magnetic method of control, computer simulation, rod, distribution of magnetic field.

Предлагаемые на мировом рынке приборы, например [1–7], для магнитного контроля параметров армирования железобетонных строительных конструкций основаны на однопараметровых способах измерения, вследствие чего их применение обусловлено необходимостью использования проектной документации на контролируемые объекты [8]. Физической основой способов являются операции: воздействие магнитным полем \vec{H}_0 преобразователя на контролируемую область конструкции и регистрация магнитного потока намагниченных прутков арматуры [9, 10], находящихся в этой области. Необходимость использования проектной документации обусловлена тем, что магнитное поле прутков определяется, как минимум, двумя параметрами объекта (толщиной *h* защитного слоя бетона и диаметром 2r прутков) и, что для определения одного из двух параметров необходимо знать (получить из документации) другой.

Для исключения необходимости использования проектной документации в [11, 12] предложен двухпараметровый способ контроля, особенностью которого является определение одновременно h и 2r по характеристикам пространственного распределения напряженности поля рассеяния \vec{H} намагниченного прутка. Экспериментальное обоснование этого способа в [12] выполнено с использованием источника однородного \vec{H}_0 , применение которого для контроля конструкций проблематично. В связи с этим, возможность использования предложенного способа требует дополнительного обоснования, применительно для источников неоднородного поля.

В данной работе представлены результаты локального намагничивания прутков арматуры неоднородным полем \vec{H}_0 постоянного магнита, обращенным к поверхности конструкции одним полюсом (рис. 1).

Модель и методика исследования

Метод исследования – компьютерное моделирование и измерение распределения напряженности магнитного поля. Исследуемая модель содержит намагничивающую систему 1, состоящую из двух постоянных магнитов, и ферромагнитный пруток 2. Магниты расположены симметрично относительно начала координат и с небольшим зазором между ними. Вектор намагниченности $\overline{M_o}$ магнитов направлен параллельно оси *OZ*. Пруток радиуса *r* расположен в плоскости *YOZ* параллельно оси *OY* на расстоянии |z| = h.



Рис. 1. Исследуемая модель: 1 – магниты; 2 – пруток

Пруток по исследуемой модели намагничивается локально неоднородным полем \vec{H}_0 постоянных магнитов, образуя в окружающем пространстве вторичное магнитное поле \vec{H} , характеристики которого определяются параметрами намагничивающего поля, параметрами прутка и его расположением относительно намагничивающей системы.

Для решения задачи использован метод конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics 5.1. Для вычисления распределения магнитного поля под действием намагничивающего поля постоянных магнитов решалась система уравнений Максвелла:

$$\vec{H} = -\nabla V_m$$

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu \vec{H}) = 0 \tag{1}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} ,$$

где \vec{H} – напряжённость магнитного поля; V_m – скалярный магнитный потенциал; \vec{B} – индукция магнитного поля; μ – магнитная проницаемость материала прутка.

Принятое в расчетах значение намагниченности \vec{M}_o постоянных магнитов, входящей в соотношение $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}_o)$, равно 950000 А/м, что является типичным значением для материала *NdFeB*. Расчеты выполнялись в приближении $\mu = const$.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлено расчетное распределение соосной $H_{\text{вн y}}$ и радиальной $H_{\text{вн z}}$ составляющих напряженности внутреннего магнитного поля на оси прутка для двух значений параметров h и r: h = 0,04 и 0,1 м; r = 0,0025 и 0,01 м.





Рис. 2. Распределение составляющих $H_{\text{вн }y}$ и $H_{\text{вн }z}$ напряженности внутреннего магнитного поля на оси прутка: а – h = 0,1 м: 1 – H_y (r = 0,0025 м); 2 – H_y (r = 0,01 м); 3 – H_z (r = 0,0025 м, 0,01м); 6 – h = 0,04 м: 1 – H_y (r = 0,0025 м); 2 – H_y (r = 0,01 м); 3 – H_z (r = 0,0025 м, 0,01м); 6 – h = 0,04 м: 1 – H_y (r = 0,0025 м);

Из рис. 2 видно, что значение составляющей $H_{\rm BH y}$ внутреннего поля на оси прутка существенно больше, чем составляющей $H_{\rm BH z}$. Отношение максимальных значений соосной и радиальной составляющих $H_{\rm BH y} / H_{\rm BH z}$ находится в диапазоне 10–40, в связи с чем основные характеристики поля рассеяния прутка определяются его продольным намагничиванием.

Сравнение величины $H_{\text{вн y}}$ в прутках различного диаметра показывает, что соосная составляющая напряженности внутреннего поля в тонком прутке примерно в 4,7 раза больше (в условиях нашей модели), чем в толстом, независимо от величины *h*. Из этого, однако, не следует, что напряженность \vec{H} поля рассеяния тонкого прутка будет больше, чем толстого, так как \vec{H} зависит не только от намагниченности материала, но и от намагниченного объема.

Составляющая $H_{\text{вн y}}$ по обе стороны от плоскости симметрии XOZ имеет различный знак, то есть намагниченность прутка в этих областях характеризуется двумя, направленными в противоположные стороны, магнитными диполями. Следовательно, магнитное поле рассеяния, формируемое преимущественно этими диполями, будет иметь зеркальную (при используемом в расчетной модели способе намагничивания), относительно плоскости XOZ, симметрию распределения напряженности \vec{H} .

На рис. 3 представлено полученное экспериментально распределение по оси OX составляющей H_x напряженности магнитного поля рассеяния прутков при h = 40 мм.



Рис. 3. Распределение составляющей H_x напряженности магнитного поля рассеяния прутков по оси OX

По графикам рис. З видно, что в распределении H_x имеются экстремумы, величина которых зависит от диаметра прутков. При этом координаты x_3 , в которых функции $H_x(x)$ достигают экстремума, одинаковы для всех значений 2r, то есть распределение напряженности \vec{H} поля рассеяния прутков не зависит от их диаметра и определяется лишь характеристиками \vec{H}_0 и положением прутка в этом поле, в нашем случае – расстоянием h. Это значит, что определение параметров h и 2r по пространственному распределению магнитного поля прутков арматуры, намагничиваемых неоднородным полем, возможно применением методики, изложенной в [12], с соответствующей коррекцией аналитических выражений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.<u>http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-600.html</u>

 $2. \underline{http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-630-650.html}$

3. http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331 b.pdf

4.<u>http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-</u> armatury-v-betone/profoscope.html?pqr=5

5. <u>http://www.stroypribor.com/produkt/catalog/naprarm/</u>

6. <u>http://www.interpribor.ru/measuring-the-thickness-of-the-protective-layer-of-concrete-poisk25</u>.

7. <u>http://www.tgindt.com/products/concrete-testing-gauge/time-tc100-tc110-rebar-locator.html</u>.

8. Улыбин, А. В. Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций / А. В. Улыбин // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1(27). – С. 4–13.

9. ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры.

10. EN 1520:2011. Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement.

11. А. с. 1243479 СССР, МКИ G 0I В 7/06. Способ измерения защитного слоя бетона и диаметра арматуры строительных конструкций и устройство для его осуществления / Н. Н. Зацепин, А. П. Гусев, С. Г. Пушкин ; заявитель и патентообладатель Ин-т прикладной физики АН БССР. – № 3556153 ; заявл. 23.02.83 ; опубл. 15.12.94, Открытия. Изобретения № 23.

12. Гусев, А. П. Железобетонные строительные конструкции. Разработка оперативного метода измерений толщины защитного слоя бетона и диаметра прутков арматуры / А. П. Гусев, С. А. Косовец // Современные строительные технологии и материалы. Импортозамещающие приборы для диагностики и контроля качества в строительстве: сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. семинара по реализации задач государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Строительство и архитектура», Минск, 19–21 сент. 2007 г. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; под ред. Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2008. – Т. 2. – С. 13–20.

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

УДК 621.74.08

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ЛИТЫХ БОКОВЫХ РАМ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

Т. И. МАКАРОВА, Н. В. МЕЛЕШКО

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» ООО «Микроакустика-М» Москва, Россия

UDC 621.74.08

ULTRASONIC TESTING OF CAST PARTS OF BOGIES WITH PHASED ARRAY TECHNIQUE *T. I. MAKAROVA, N. V. MELESHKO*

Аннотация

В данной статье рассматривается возможность ультразвукового контроля литых деталей тележки грузового вагона сложной конфигурации на примере боковой рамы тележки модели 18-100. Представлены выбранные параметры контроля и схемы сканирования для различных зон контроля. Для реализации контроля с литых поверхностей, имеющих высокую шероховатость, спроектированы и произведены специальные призмы из Аквалена. В статье приведены результаты контроля образцов с искусственными и естественными дефектами.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, литые детали, дефекты литья, фазированная решетка, аквален, эластомерная призма, электронное сканирование, настроечный образец, железнодорожный транспорт, тележка грузового вагона, боковая рама.

Abstract

The article describes possibilities of phased array flaw detectors application for testing of railway transport units, such as cast parts of bogies of freight cars. The task was to reproduce the standard testing procedures using phased array flaw detectors and demonstrate their advantages in visibility, efficiency, repeatability, results validity.

Sector scanning technique with the phased array flaw detectors OmniScan in the minimum configuration was used for the research. In the all cases acoustical images of the following reflectors were obtained within the range of selected angles: side drilled holes and natural defects in solebars.

Solebar testing has been more complicated because of a form and irregularity of scanning surface and a complex profile of back surface.

Application of phased arrays substantially increases testing efficiency and improves visibility of obtained results.

Key words:

non-destructive testing, ultrasonic testing, cast parts, casting defects, phased array, aqualene, elastomeric wedge, electronic scanning, reference block, railway transport, bogie of freight car, solebar.

Введение

Главной задачей железнодорожных грузовых и пассажирских перевозок является обеспечение безопасности. Основной причиной крупных аварий на железнодорожном транспорте является излом ответственных деталей колесной пары. Наиболее часто такой деталью является боковая рама. Изломы происходят по ряду причин, из которых основной является образование и развитие усталостных трещин в радиусном переходе R55 буксового проема, что, в свою очередь, связано с наличием внутренних литейных дефектов [1].

Анализ актуальной нормативно-технической документации (НТД) показал, что неразрушающий контроль боковых рам при изготовлении и эксплуатации предполагает обнаружение только поверхностных дефектов с помощью магнитопорошкового метода [2]. Таким образом, выявление внутренних дефектов по действующей НТД не предусмотрено, что и является главной проблемой.

Особенности ультразвукового контроля литых деталей

Особенности традиционного ультразвукового контроля (УЗК) литых деталей определяется несколькими специфическими факторами [3]:

– сложная форма, связанная с различной кривизной поверхности и переменной толщиной в разных областях детали;

– наличие нерегулярных конструктивных отражателей, предусмотренных чертежно-технической документацией, но затрудняющих расшифровку индикаций на A-скане;

 сложная форма несплошностей, приводящая к большому рассеянию акустического поля;

– необходимость подготовки поверхности ввиду высокой шероховатости.

Основными методами УЗК отливок являются эхо-метод и зеркальнотеневой. Контроль изделий толщиной до 50 мм производят прямыми раздельно-совмещенными и наклонными пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП), причем угол ввода выбирают из диапазона 37–70°.

Возможно, именно из-за перечисленных выше факторов УЗК для выявления внутренних дефектов не нашел применения при контроле боковых рам на железнодорожном транспорте.

Благодаря современным дефектоскопам с фазированными решетками (ФР) возможно решить ряд проблем, связанных с применением УЗК литых деталей тележки. Основным преимуществом данной технологии является возможность электронного управления параметрами ультразвукового луча. Электронное сканирование может осуществляться в любом диапазоне углов, что позволяет обнаруживать дефекты, различно ориентированные относительно акустической оси. Полученное с помощью ФР изображение наглядно отображает сигналы от дефектов и конструктивных особенностей под разными углами, что позволяет определить тип и размер дефектов и отстроиться от мешающих эхо-сигналов. Данный метод позволяет значительно расширить зону охвата сканирования, следовательно, и площадь обнаружения путем устранения сложных приспособлений и многочисленных преобразователей, часто используемых в традиционном УЗК [4].

Настройка и результаты контроля

Ранее в статье [5] были описаны результаты исследований с помощью дефектоскопа OmniScan компании Olympus с ФР и наклонной призмой из оргстекла. В данной статье представлены результаты УЗК образцов боковой рамы тележки модели 18–100 дефектоскопом с фазированными решетками и эластомерной призмой.

Эластомерная призма изготовлена из материала аквален, акустический импеданс которого приблизительно равен импедансу воды, а скорость продольных волн равна 1590 м/с, что позволяет получить больший угол преломления при переходе в сталь. Применение такой призмы дает возможность проводить контроль неподготовленной поверхности высокой шероховатости, так как аквален достаточно гибкий. Также есть возможность вырезать призму любой формы из листа такого материала, что решает проблему контроля деталей сложной конфигурации.

Для исследований использовался дефектоскоп Omniscan SX с фазированной 16-элементной решеткой рабочей частотой 5,0 МГц. Были спроектированы и изготовлены призмы из аквалена для осуществления контроля поперечными волнами (рис. 1).

a)

б)



Рис. 1. Чертежи и фотографии изготовленных призм: а – с фиксацией решетки под определенным углом и заполнением пространства водой; б – с наклонной плоскостью.

Для контроля зоны радиусного перехода R55 буксового проема применялось секторное сканирование поперечными волнами в диапазоне углов от 40 до 70° с фокусным расстоянием равным 20 мм (максимальная толщина детали). При данных параметрах контроля мертвая зона оказалась меньше 3 мм. Для настройки скорости, задержки в призме, угловой чувствительности использовался настроечный образец (НО), выполненный из фрагмента боковой рамы, с искусственными отражателями типа боковое центральное отверстие (БЦО) диаметром 2 мм, расположенными на разных глубинах (рис. 2).



a)

Рис. 2. Изображение настроечного образца из фрагмента боковой рамы (а); чертеж настроечного образца (б)

Также была настроена временная регулировка чувствительности (ВРЧ) для выравнивания амплитуд эхо-сигналов от одинаковых отражателей, расположенных на разной глубине. Для настройки использовались БЦО 2 мм в НО на глубинах 5, 10, 20 мм.

Браковочный уровень был настроен по амплитуде эхо-сигнала от БЦО 2 мм на глубине 20 мм в НО из материала боковой рамы.

На территории Тихвинского испытательного центра железнодорожной техники (ТИЦЖТ) с помощью предложенного оборудования и созданной настройки был проведен ультразвуковой контроль фрагментов боковых рам с естественными дефектами, образца пробы-свидетеля отливки. Результаты контроля представлены на рис. 3–5.



Рис. 3. Результаты контроля фрагмента боковой рамы с естественным дефектом: а – установка ФР на образце; б – акустическое изображение естественного дефекта на глубине 17 мм



Рис. 4. Результаты контроля фрагмента боковой рамы с естественным дефектом: а – установка ФР на образце; б – акустическое изображение естественного дефекта на глубине 15 мм

Как видно, контроль фрагментов проводился с неподготовленной поверхности и естественные дефекты при данной настройке были выявлены.



Рис. 5. Результаты контроля образца пробы-свидетеля отливки: а – установка ФР на образце; б – С-скан (прямоугольниками обозначены обнаруженные протяженные дефекты на глубинах 19 и 17 мм)

Результаты контроля пробы-свидетеля были подтверждены по результатам металлографических исследований. На рис. 6 представлено изображение среза пробы-свидетеля отливки, на котором действительно обнаружен дефект, протяженность когорого совпадает с условной протяженностью.



Рис. 6. Изображение среза пробы-свидетеля отливки

Заключение

Результаты, полученные при контроле с помощью эластомерной призмы, показывают применимость данной технологии в условиях работы с неподготовленной поверхностью высокой шероховатости и позволяют выявить внутренние дефекты литья.

Для подтверждения результатов контроля планируется рассчитать математическую модель с помощью программного обеспечения CIVA.

Также необходимо провести исследования с использованием дополнительного оборудования. Планируется спроектировать призму, сопрягаемую с радиусным переходом буксового проема, для увеличения области сканирования и повышения эффективности предложенной технологии, а также использовать секторную фазированную решетку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Излом боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. В. Монастырский [и др.] // Машиностроение. – 2012. – № 5. – С.60–65.

2. Маловичко, В. В. Критерии браковки литых деталей / В. В. Маловичко // Мир транспорта. – 2015. – 13 т. (№5). – С.238–249.

3. **Кретов, Е. Ф.** Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е. Ф. Кретов. – СПб : СВЕН, 2011. – 312 с.

4. Introduction to phased array ultrasonic technology applications: R/D Tech Guideline / Quebec (Canada). -2004. -348 p.

5. Ультразвуковой контроль узлов железнодорожного транспорта дефектоскопами с фазированными решетками. Ч. 2 / Н. В. Мелешко [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2015. – 18 т. № 4. – С. 76–80.

E-mail: <u>taya1004@yandex.ru</u> <u>meleshkonatalia@gmail.com</u>

УДК 620.179.14

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

В. А. НОВИКОВ, А. В. КУШНЕР, А. В. ШИЛОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 620.179.14

SOME SPECIFIC OF MAGNETOGRAPHIC THE TESTING OF FERROMAGNETIC OBJECTS ON RESIDUAL MAGNETICITY V. A. NOVIKOV, A. V. KUSHNER, A. V. SHILOV

Аннотация

Работа посвящена магнитографической дефектоскопии ферромагнитных объектов. Показано, что чувствительность метода контроля на остаточной намагниченности ниже, чем в приложенном поле. Установлено, что на величину сигнала, обусловленного дефектом, при контроле на остаточной намагниченности влияет направление укладки магнитоносителя на контролируемую поверхность. Приведено объяснение этого явления.

Ключевые слова:

магнитографический контроль, постоянные магниты, ферромагнитные объекты, полярность сигнала, условия контроля.

Abstract

The work is devoted to magnetographic the testing of ferromagnetic objects. It is determined that the sensitivity of the testing method on residual magnetization is lower than in the applied field. It is established that the value of a signal caused by the defect is influenced by the direction of the placement of the magnetic carrier on the monitored surface when controlling for remanent magnetization. An explanation of this phenomenon is given.

Key words:

magnitographic the testing, constant magnets, ferromagnetic object, polarity of a signal, a control condition.

Магнитные методы контроля основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий. Обычно дефектоскопию ферромагнитных объектов магнитными методами производят в приложенном поле, т. к. это позволяет достичь в контролируемой зоне большей индукции и, как следствие, более высокой чувствительности при обнаружении дефектов сплошности. Однако часто предпочтение все же отдают контролю на остаточной намагниченности, так как, в ряде случаев, этот способ имеет преимущества.

Контроль объектов на остаточной намагниченности производят, если они изготовлены из магнитожестких материалов, а остаточная индукция не меньше 0,5 Тл, при условии, что толщина немагнитного покрытия на поверхности объекта не превышает 30 мкм. Иногда при этом достигается более высокая чувствительность, чем при контроле в приложенном поле, например, в случае магнитопорошкового метода контроля, если детали имеют выраженную текстуру, когда магнитный порошок в меньшей степени осаждается по волокнам металла, в местах с грубой обработкой поверхности, по наклёпу, по рискам, что упрощает расшифровку результатов контроля. Кроме того, способ контроля на остаточной намагниченности более удобен в осуществлении, так как позволяет устанавливать детали в любое пространственное положение, обеспечивает возможность нанесения суспензии как путём полива, так и путём погружения в ванну с дефектоскопическим материалом. Важно и то, что в этом случае будет меньше вероятность прижогов в местах контакта токоподводящих электродов с деталью при ее намагничивании пропусканием тока. Поэтому в равных условиях предпочтение отдают способу остаточной намагниченности.

При феррозондовом методе контроля цилиндрических объектов помехой может быть составляющая внешнего поля, направленная вдоль продольной оси сердечника феррозонда, которая иногда в несколько раз превышает напряженность поля, создаваемого дефектом. Чтобы уменьшить влияние этого мешающего фактора, сердечники феррозонда ориентируют перпендикулярно цилиндрической поверхности объекта с помощью специального устройства. Однако радикальным способом отстройки от помехи, обусловленной намагничивающим полем, является контроль объекта на остаточной намагниченности.

Снижение чувствительности магнитографической дефектоскопии на остаточной намагниченности происходит из-за того, что поля рассеяния дефектов записываются на участке начального (обратимого) намагничивания магнитоносителя. При этом остаточная намагниченность магнитоносителя после его удаления от объекта контроля равна нулю. Устранить этот недостаток можно, если применить поляризованный (предварительно намагниченный до насыщения магнитоноситель), а намагничивание объекта вместе с уложенным на его поверхность магнитоносителем производить противоположно направлению его остаточной намагниченности. Вторая причина заключатся в том, что узкие поверхностные трещины создают на магнитоносителе узколокальные магнитные отпечатки. Создаваемые ими магнитные потоки, в основном, замыкаются в рабочем зазоре индукционной магнитной головки магнитографического дефектоскопа и меньше замыкаются через сердечник магнитной головки. Кроме того, в этом случае возникают значительные частотные потери, связанные с ростом вихревых токов в сердечнике головки. Поэтому такие дефекты можно обнаружить,

если магнитную ленту в процессе намагничивания изделия переместить со скольжением на небольшое расстояние поперек трещины.

Авторы настоящей работы обнаружили и объяснили третью причину снижения чувствительности при магнитографическом контроле ферромагнитных объектов на остаточной намагниченности: установлено, что амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, зависит от направления укладки магнитоносителя (поперек направления дефекта или вдоль его), и во втором случае она в несколько раз больше, чем в первом. Это объясняется следующим. Если магнитоноситель укладывают на поверхность предварительно намагниченного объекта поперек направления предполагаемой ориентации дефектов путем его поворота вокруг точки касания с объектом (рис. 1), то под действием поля рассеяния дефекта в процессе поворота магнитоносителя его участок, на котором будет происходить запись поля рассеяния дефекта, приобретет более высокую намагниченность, чем другие его участки.

На рис. 1 показано, как в процессе укладки магнитоносителя на поверхность предварительно намагниченного контролируемого объекта происходит воздействие на него поля рассеяния дефекта.



Рис. 1. Воздействие на магнитоноситель поля рассеяния дефекта, когда магнитоноситель укладывают на поверхность объекта или снимают с поверхности поперек направления предполагаемой ориентации дефектов: 1 – объект контроля; 2 – магнитоноситель; 3 – поле рассеяния дефекта; 4 – дефект сплошности

На рис. 2 изображен магнитоноситель на поверхности объекта после его укладки поперек направления предполагаемой ориентации дефектов, находящийся под действием поля рассеяния дефекта. Объясним процесс записи полей дефектов в этом случае.



Рис. 2. Магнитоноситель на поверхности объекта, находящийся под действием поля рассеяния дефекта, после его укладки поперек направления предполагаемой ориентации дефектов: 1 – объект контроля; 2 – магнитоноситель; 3 – поле рассеяния дефекта; 4 – дефект сплошности; 5 – участок магнитоносителя с более высокой остаточной намагниченностью

Суперпозиция внешнего поля, обусловленного полюсностью, возникающей на поверхности объекта, и поля рассеяния дефекта H₀ + H_{d1} при повороте магнитоносителя определяет положение рабочей точки характеристики магнитоносителя в зоне дефекта (рис. 3). На магнитоноситель, когда он находится на поверхности объекта, локально действует поле рассеяния дефекта H_{d2}, намагничивая его дополнительным полем. После снятия магнитоносителя с объекта, вдоль направления предполагаемой ориентации дефектов или снизу вверх контраст записи на участке магнитоносителя, находившегося над дефектом, будет определяться отрезком $\Delta M_r = M_{r2} - M_{r1}$, где M_{r1} – остаточная намагниченность участка магнитоносителя, обусловленная суперпозицией полей H₀ + H_{d1}; M_{r2} - остаточная намагниченность магнитоносителя над дефектом, находившегося под действием магнитных полей H₀ + H_{d2}.



Рис. 3. Контраст записи на магнитоносителе, если его укладывали на контролируемую поверхность намагниченного объекта поперек направления предполагаемой ориентации дефектов, после его снятия с объекта вдоль направления предполагаемой ориентации дефектов или снизу вверх Если магнитоноситель укладывают на поверхность контролируемого участка последовательно от его начала вдоль направления предполагаемой ориентации дефектов или сверху, снимая с поверхности вдоль того же направления, то амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, будет больше, т. к. рабочая точка будет находиться у начала крутого возрастающего участка его характеристики, и рабочий диапазон характеристики будет шире. Поэтому контраст магнитной записи на магнитоносителе будет больше. Объясняется это следующим. При такой укладке на магнитоноситель будут действовать только внешнее поле H_0 , обусловленное полюсностью объекта, и поле рассеяния дефекта H_{d2} (рис. 4).



Рис. 4. Контраст записи на магнитоносителе при его укладке на контролируемую поверхность намагниченного объекта вдоль направления предполагаемой ориентации дефектов или сверху, после снятия магнитоносителя вдоль того же направления

После снятия магнитоносителя его участок, находившийся под действием внешнего поля H_0 , приобретет остаточную намагниченность M_{r0} , а участок, находившийся под действием суперпозиции внешнего поля и поля рассеяния дефекта $H_0 + H_{d2}$, – остаточную намагниченность M_{r2} . Контраст магнитной записи на магнитоносителе будет $\Delta M_r = M_{r2} - M_{r0}$. Причем, $\Delta M_r > \Delta M_r'$.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований, которые показали, что амплитуда сигнала от дефекта во втором случае больше, чем в первом в несколько раз. Исследования проводили на образцах:

– для настройки вихретокового дефектоскопа СОП 2353.08 толщиной
 6 мм из стали 45 с искусственными протяженными дефектами шириной

0,1 мм и глубиной 0,6, 1,5 и 3 мм на стороне с параметром шероховатости Rz160 и глубиной 0,1, 0,2, 0,5, 1 и 2 мм на стороне с Ra1,25;

– пластине из стали 45 размерами 100х40х9 мм с канавками на наружной поверхности глубиной 1 и 2 мм шириной 0,1 мм;

– торцевой (присоединительной) поверхности щита электродвигателя, изготовленного литьем из серого чугуна СЧ 24-44. В щите электродвигателя имелась трещина раскрытием 34 мкм, выходящая на торцевую сторону. Трещина распространялась на всю ширину присоединительной поверхности, т. е. ее длина составляла 8 мм, а глубина – от 4,6 до 4,9 мм.

Намагничивание объекта производили перемещением постоянного магнита по поверхности объекта перед наложением магнитоносителя. В одном случае магнитоноситель укладывали на объект поперек протяженного дефекта путем поворота (рис. 1), а во втором – вдоль трещины или сверху, снимая с объекта вдоль того же направления. В процессе наложения не допускалось проскальзывание магнитоносителя по поверхности объекта.

В результате проведенных исследований установлено, что при магнитографическом контроле на остаточной намагниченности с намагничиванием объекта контроля перемещаемым постоянным магнитом, чувствительность невысокая даже при обнаружении поверхностных дефектов. Глубина обнаруживаемых дефектов не менее 1 мм и зависит от направления укладки магнитоносителя. Если магнитоноситель укладывают на объект вдоль трещины или сверху, снимая с объекта вдоль того же направления, то амплитуда сигнала от дефекта больше в несколько раз по сравнению со случаем, когда магнитоноситель укладывают поперек направления дефекта. Если же контроль производят в приложенном поле, т. е. магнит перемещают по поверхности немагнитной основы магнитоносителя, находящегося на поверхности объекта, то обнаруживаются дефекты глубиной 0,1 мм и больше при параметре шероховатости Ra1,25, а также 0,6 мм и больше при Rz160.

УДК 621.03

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИНСПЕКЦИОННО-ДОСМОТРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ТАМОЖЕННОМ ДОСМОТРЕ АВТОМОБИЛЕЙ

И. В. ПАВЛОВ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Санкт-Петербург, Россия

UDC 621.03

THE USE OF X-RAY VEHICLE INSPECTION STATIONS FOR CUSTOMS CLEARANCE OF CARS *I. V. PAVLOV*

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы применения рентгеновских инспекционно-досмотровых комплексов (ИДК) при проведении таможенного досмотра автомобилей, анализируются их возможности и эффективность применения.

Ключевые слова:

неразрушающий рентгеновский контроль; таможенный контроль инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК); инспекционно-досмотровые ускорительные комплексы (ИДУК).

Abstract

The article discusses the use of x-ray inspection systems (IDK) when conducting the customs clearance of vehicles, and analyzes their capabilities and effectiveness.

Key words:

Non-destructive x-ray inspection customs control inspection complexes (IDC); inspection of the accelerator complexes (IDOK).

С каждым годом поток автотранспорта через таможенные границы России увеличивается. Международный автомобильный пропускной пункт (МАПП) Торфяновка на российско-финской границе является крупнейшим в России, но и на нем очередь грузовых автомобилей, дожидающихся досмотра, растягивается в иные дни на 40 км. В этих условиях внедрение в таможенную практику современных инспекционно-досмотровых комплексов (ИДК или ИДУК - инспекционно-досмотровых ускорительных комплексов), позволяющих досмотреть грузовую автомашину без разгрузки и снятия пломб за 10-12 мин, является, актуальным и важным. (Теоретически возможно контролировать до 25 автомобилей в ч, но на практике с анализом документации, расшифровкой получаемых изображений и вынесением решения, процесс занимает больше времени). Основными сдерживающими факторами внедрения ИДК является высокая стоимость (стоимость одного ИДК достигает 4-8 млн евро, в зависимости от комплектации) и отсутствие технически грамотных специалистов, способных эксплуатировать такую технику [1].
Первые ИДК были подарены российской таможне Евросоюзом, а подготовку специалистов, наравне с филиалом Таможенной академии готовила кафедра «Приборостроение» в рамках специализации «Приборы и системы экспортного и импортного контроля». Внедрение современных информационных технологий в российскую таможенную практику предполагает функционирование на пунктах пропуска ИДК, объединенных в единую информационную систему таможенной службы России. Использование ИДК при проведении таможенного контроля крупногабаритных грузов и транспортных средств позволит значительно повысить качество работы таможенных органов России. Помимо этого, внедрение ИДК оправдано с экономической точки зрения.

Перед тем как окончательно оформить концепцию создания системы таможенного контроля с помощью ИДК, специалистами ФТС был тщательно исследован имеющийся опыт использования комплексов в Китае, Германии и других странах.

До 2005 г. в России не было аналогичного опыта применения ИДК на пропускных пунктах. Только в ноябре 2005 г. был сдан первый ИДК на многостороннем пропускном пункте «Троебортное» Брянской таможни (российско-украинская граница), в 2007 году стационарный ИДК был открыт на МАПП «Торфяновка». Первые ИДК, внедрённые на таможне, произведены немецким концерном Smith Heimann. Комплекс позволяет в достаточно короткие сроки и, главное, без вскрытия и разгрузки транспортного средства идентифицировать перевозимые товары, узлы транспортного средства, а также выявить предметы, запрещенные к перевозке. Немецкий производитель был выбран в качестве поставщика, поскольку производимые им ИДК наиболее полно соответствовали конкурсным требованиям и по качеству, и по цене. Кроме того, именно с концерном Smith Heimann была достигнута договоренность о создании производства по сборке ИДК из немецких комплектующих на российских производственных площадях. Внедрение ИДК на российских таможенных пунктах, естественно, повлекло за собой изменения в организационно-штатной структуре таможенных органов [2, 3].

Мобильный ИДК на таможенном переходе «Торфяновка» используется в зоне таможенного контроля, где необходимо проведение проверки транспортных средств и крупногабаритных грузов, но нет возможности установить стационарную систему.

Мобильный ИДК (рис. 1, 2) полностью размещается на шасси автомобиля. Развёртывание комплекса в рабочее положение занимает несколько десятков минут. Для его работы необходима ровная площадка с двумя заасфальтированными полосами (фактически для этого может быть использован участок автодороги). Особое внимание при эксплуатации мобильного ИДК следует уделить организации и обеспечению режима зоны радиационной безопасности (санитарной зоны).

Мобильные ИДК предназначены для рентгеновского контроля крупногабаритных объектов, при этом сам объект остаётся неподвижным, а сканирование осуществляется за счёт перемещения рампы ИДК. Мобильные ИДК отличаются высокой оперативностью.

Среди данного вида ИДК существует разделение на низкоэнергетические, среднеэнергетические и высокоэнергетические. Низкоэнергетические (до 300 кэВ) мобильные ИДК имеют наименьшую проникающую способность излучения (не более 50 мм по стали), обладают повышенной производительностью (до 30 досматриваемых объектов в час), более радиационно безопасны и позволяют определить внутреннее содержимое объекта таможенного контроля без его детального анализа. Они разработаны для решения конкретной оперативной задачи: досмотра малозагруженных контейнеров и автомобилей.





Рис. 1. Мобильный ИДК в транс-портном положении

Рис. 2. Мобильный ИДК в рабочем положении

Рабочее место оператора располагается в специальной кабине, защищённой от рентгеновского излучения.

Среднеэнергетические (2,5 МэВ) и высокоэнергетические (более 4 МэВ) мобильные ИДК способны обеспечить рентгеновский досмотр полностью загруженных грузовиков, трейлеров и контейнеров. Они могут также использоваться для проверки объектов, которые нельзя передвигать. За счёт повышения энергии излучения у этих систем больше глубина проникновения излучения (до 200 мм по стали), выше качество рентгеновской теневой картины. С их помощью можно изучать не только внутреннее содержимое объектов контроля, но и внутреннее строение предметов, находящихся внутри объектов контроля.



Рис. 3. Выпускник кафедры на рабочем месте в ИДК



Рис. 4. Выпускники кафедры – оператор ИДК и руководитель группы ИДК

При досмотре легковых автомобилей существует техническая проблема досмотра нижней части (порогов и днища автомобиля), поскольку сканирующая рампа ИДК передвигается, как правило, на высоте выше клиренса (16,5–18 см) легковых автомобилей.

Ниже приведены технические данные, поступающего на оснащение таможенной службы России, мобильного инспекционно-досмотрового комплекса Heimann CargoVision – HCV-Mobile.

КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ				
Проникающая способность	Не менее 280 мм в стали			
Разрешающая способность	Стальная проволока: 0,8 мм			
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И РАЗМЕР СКАНИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ				
Производительность сканирования для транспортных средств длиной 18 м	25 транспортных средств / час			
Максимальные размеры транспортного средства (габаритные)	Максимальный диапазон для проверяемого объекта: 3 х 4,7 м (Ш х В) для грузовых автомобилей; Длина 18–27 м в соответствии с требованиями по зоне безопасности			
ДОЗЫ РАДИАЦИИ				
Максимальная поглощенная доза на одно сканирование	Менее 8 мкЗв /сканирование (как правило, 2 мкЗв / сканирование) Примечание: максимальная доза, допусти- мая Международной организацией здраво- охранения: 500 000 мкГр			
КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА				
Емкость хранения баз данных	10000 изображений (144 Гб)			
Мощность архивирования	400 наборов данных для DVD-ROM (4.7 Гб)			
Инструменты обработки изображения	Имеется ряд инструментов, дружественный и эргономичный интерфейс оператора /компьютера			
Рабочая станция базы данных	Совмещена с рабочей станцией изображения			
ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО				
Ходовая часть	Mercedes-Benz « AXOR » 2533 VL			

Технические данные приведены в соответствии с формуляром рентгенотелевизионного инспекционно-досмотровый комплекса HCV-MOBILE (ТЕХНО-30.93.168 ФО). Система визуализации мобильного инспекционно-досмотрового комплекса дает операторам возможность видеть содержимое закрытых полостей (пороги, днища, колёсные арки, колёсные диски и т. д.) транспортных средств и контейнеров, не занимаясь разгрузкой этого содержимого, а также упрощает процедуру обнаружения контрабанды и других предметов, запрещенных к ввозу и вывозу через границу (см. рис. 5, 6).





Рис. 5. Изображение легкового Рис. 6. Изображение грузового автомобиля

Этот комплекс позволяет оперативно определить соответствие груза сопроводительным документам. Установленная на устойчивой грузовой платформе система, обеспечивает возможность инспектирования в самых разнообразных условиях – от сканирования неподвижных контейнеров в портах до досмотра транспортных средств в движении при пересечении границы с высокой пропускной способностью. Система мобильного ИДК обеспечивает множество возможностей для различных условий сканирования.

В настоящее время мобильными и стационарными ИДК снабжены все МАПП на российско-финской границе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инспекционно-досмотровые комплексы / А. Н. Мячин [и др.]. – СПб. : Изд. РИО СПб филиала РТА, 2007.

2. Попов, О. Р. Технические средства таможенного контроля / О. Р. Попов. – 2006 г.

3. **Павлов, И. В.** Таможенный досмотр автомобилей с помощью ИДК / И. В. Павлов, А. Н. Малыгин // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении : материалы региональный межвузовской науч.-практ. конф. – СПб. : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» – С. 171–174.

УДК 621.18 МЕТОДИКА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ ДОКУМЕНТОВ САМОХОДНЫХ МАШИН, ПОДВЕДОМСТВЕННЫХ ГОСТЕХНАДЗОРУ

И. В. ПАВЛОВ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» Санкт-Петербург, Россия

UDC 621.18

METHODS AND MEANS OF CONTROL OF AUTHENTICITY OF DOCUMENTS SELF-PROPELLED MACHINES UNDER THE GOSTEKHNADZOR I. V. PAVLOV

Аннотация

В последнее время в России закупается большое число импортной дорогостоящей самоходной техники, которая часто похищается, эксплуатируется по поддельным документам водителями с поддельными удостоверениями на право управления. Всё это наносит большой ущерб государству и частным компаниям. В статье рассматривается проблема контроля подлинности документов самоходных машин, подведомственных Гостехнадзору (бульдозеры, тракторы, скреперы, самоходные буровые установки, подъёмные краны, асфальтовые катки и т.д.).

Ключевые слова:

самоходная техника, тракторы, поддельные документы, методы контроля подлинности, приборы контроля подлинности, методика контроля.

Abstract

The last time Russia purchased a large number of expensive imported selfpropelled equipment that is often stolen and used on forged documents and drivers with fake licences to control. All this causes great damage to the state and private companies. The article considers the problem of document authenticity control of selfpropelled vehicles under the jurisdiction of the Gostekhnadzor (bulldozers, tractors, scrapers, self-propelled drilling rigs, cranes, asphalt rollers, etc.)

Key words:

self-propelled machines, tractors, forged documents, methods of authentication, control devices of authenticity, methods of control.

Количество и разнообразие самоходных машин в России растёт огромными темпами. Еще 20–30 лет тому назад номенклатура их была очень скудна: тракторы, бульдозеры, экскаваторы, подъемные краны, асфальтоукладчики и дорожные катки, в различных модификациях. А, самое главное, у всех был один хозяин – государство.

В настоящее время ситуация резко изменилась: огромное количество отечественной и зарубежной самоходной техники, стоимостью от сотен

тысяч до сотен миллионов рублей, находится в собственности физических и юридических лиц, и становится лакомым куском для хищений и разного рода злоупотреблений. С другой стороны – увеличиваются требования к техническому состоянию самоходных машин, их учёту и к документам на право управления этой техникой. И если с автомобильным транспортом, передвигающимся по дорогам ГАИ (ГИБДД) за долгие годы своего существования навела относительный порядок, то в вопросе эксплуатации самоходных машин он только наводится специально созданной организацией Государственная инспекция по надзору за техническим состоянием самоходных машин и других видов техники «Гостехнадзор». Многие находятся в неведении о том, что купив квадроцикл или снегоход необходимо поставить его на учёт как и автомашину, получить удостоверение на право управления, пройти технический осмотр. Аналогичная ситуация и с юридическими лицами, владеющими трелёвочными тракторами, карьерной техникой и т д., которые допускают к её эксплуатации случайных людей. Всё это приводит к авариям с человеческими жертвами. Однако, постепенно, понятие о необходимости регистрации самоходных машин и необходимости допуска к управлению ими только людей, имеющих специальное водительское удостоверение (категорию), приходит.

Но часто проблема решается просто: необходимые документы покупаются через Интернет, благо предложения имеются в избытке.

Государство знает эту проблему и ищет меры для её решения. На смену незащищённым паспортам, отпечатанным на обычной потребительской бумаге, приходят защищённые от подделки бланки документов, но, к сожалению, определить их подлинность специалисты Гостехнадзора не могут — бланки отпечатаны в разных типографиях, имеют разные элементы защиты и т.д.

Удостоверение на право управления спецтехникой выдаётся государственной инспекцией Гостехнадзора, но, к сожалению, из-за огромных размеров нашей страны и плохо прописанной нормативной базы, в разных регионах одновременно появились бланки документов различного внешнего вида и с различными способами защиты от подделок, что также затрудняет контроль их подлинности. Защищены от подделки разнообразные сопутствующие документы (полисы, паспорта, свидетельства).

Медицинские документы, выдаваемые специальными комиссиями, и документы врачей, работающих в комиссиях, также защищены от подделки, но как контролировать их подлинность практически никто не знает.

Государство выпускает разнообразные поясняющие буклеты, но эффективность их очень низка – трудно разобраться в специальной терминологии и методиках выявления защитных признаков без специальной подготовки.

Попробуем в этом разобраться. Защита от подделки ценных бумаг осуществляется с помощью комплекса защитных элементов, вносимых в бумагу на разных стадиях её изготовления. Защита ценных бумаг от под-

делок обеспечивается за счет использования особых технологий, определенного сочетания способов и приемов нанесения полиграфического оформления, а также за счет применения специальных материалов.

Все (или большинство) этих защитных признаков есть на удостоверении тракториста-машиниста.

Прежде чем перейти к анализу методики контроля подделок, кратко проанализируем, с какими подделками можно встретиться на практике. Подделки бывают полные, когда подделывается и бланк документа и его заполнение, частичные, когда заменяются отдельные реквизиты (номера, фамилии и т.д.), имитации, когда на принтере имитируются защитные признаки, создаваемые специальными способами печати и монтаж из нескольких подлинных документов (рис. 1).

Рассмотрим кратко методику контроля подлинности документов самоходных машин.

Первоначальный контроль можно производить в полевых условиях с помощью простейших специализированных профессиональных луп с подсветкой или портативных приборов, лёгких, компактных, имеющих футляр для крепления на ремне, наподобие мобильных телефонов [1, 2].

Первый этап – визуальный осмотр документа. Конечно, эксперт должен сначала детально изучить образец – документ, подлинность которого не вызывает сомнений. Отсюда первое правило экспертизы – искать не схожесть проверяемого документа с эталоном, а различие. Первое, что необходимо проверить – текст бланка и его заполнения, цветовую гамму бланка удостоверения, его подкладной сетки. Подкладная сетка представляет собой нерегулярную сетку тончайших штрихов, переплетающихся друг с другом, выполненных по сложному математическому закону, наносится орловской печатью в голубовато-серовато-розовых тонах, плавно переходящих из одного цвета в другой. Цвета специально подбираются такие, каких нет в стандартном наборе печатных машин или принтеров. Поэтому при печати они должны синтезироваться печатной машиной из стандартных цветов. Орловская печать, разработанная специально для печати денег и документов, не применяется в обычной полиграфии, позволяет сделать плавный переход цветов, при применении других способов печати это сделать очень проблематично. Цветовая гамма должна соответствовать образцу.

Второе, что необходимо проверить на просвет – наличие водяного знака (буквы RUS), они должны по цвету и расположению соответствовать эталонному документу. Отсутствие водяного знака является вторым признаком, по которому удостоверение может быть изъято для направления на экспертизу. Если водяной знак (буквы RUS) более тёмные, чем основной фон, значит перед Вами не водяной знак, а сделанная светлой краской надпечатка с оборотной стороны документа перед его сложением и ламинированием. Третье, что следует проверить визуально – код региона и регион выдачи. Если удостоверение выдано в Санкт-Петербурге, код региона должен быть 78.

Четвёртое – необходимо проверить внешний вид печати, её размер и принадлежность Гостехнадзору. При помощи приборов прочитать надписи на печатях, проверить их соответствие регламентированному тексту, отсутствие пропущенных букв, орфографических ошибок. Наиболее частые ошибки: вместо «Гостехнадзор» пишут «гортехнадзор» или «горгостехнадзор», слово «Российская» пишут с одним «с» и т. д.



Рис. 1. Поддельное удостоверение тракториста выданное (по записи) в Санкт-Петербурге с печатью и номером региона города Москвы

Если хотя бы один, из вышеперечисленных признаков, вызывает подозрение – необходимо провести на месте первичный инструментальный контроль с помощью профессиональной лупы или прибора типа «Регула 1017». Также необходимо проверить качество голограммы и соответствие её отражательных свойств эталону.

Пятое – необходимо проверить подпись владельца, для чего попросите его расписаться, например, в протоколе. На поддельном удостоверении подпись, чаще всего, будет резко отличаться, так как при заказе удостоверения через Интернет заказчик передаёт фальшивомонетчикам только фотографию, а получает уже ламинированный документ, поэтому видно, что подпись выполнена не скорописью, как у всех нормальных людей, а тщательно прописана, поставлен просто крючок или подпись сделана скорописью, но совершенно не похожа на фамилию владельца.

К сожалению, на бланке удостоверения не предусмотрена расшифровка подписи главного государственного инженера-инспектора (их не так много), но, даже не зная фамилии инспектора, подпись может вызвать подозрение.

При 10-ти кратном увеличении рекомендованных приборов, включив внутреннюю подсветку на разных участках удостоверения, проверить качество выполнения гильоширного рисунка подкладной сетки, контролируя одинаковую толщину и насыщенность цвета линий, отсутствие разрывов или наложений их при изменении цвета.

Проверить соответствие серии и номера выдаваемым в регионе, номер удостоверения проставляется на специальной нумеровальной машине методом высокой печати, что контролируется наличием характерного натиска – сгущения краски по краям букв и цифр. На рис. 1 чётко видно, что номер напечатан на принтере, который, не имея краски нужного цвета, пытался её синтезировать из различных цветов, включая чёрный.

При помощи приборов проверить шрифт бланка – он должен иметь специфическое начертание, не соответствующее ни одному из стандартных шрифтов компьютера. Линии бланка, над которыми наносится заполнение бланка (Ф.И.О. и т.д.). Шрифт бланка и шрифт заполнения бланка не должны иметь одинаковое начертание и одинаковые дефекты исполнения.

При помощи лупы проверить качество высечки документа – оно должно быть сделано специальным штампом, линий разметки границ документа не должно быть. На поддельном документе может быть даже видна разметка для нарезки и бахрома от неряшливой нарезки. Из рис. 1 четко видны остатки линий разметки, нанесённые принтером, плохая обрезка, тупым ножом.

Проверить на обратной стороне разрешающие отметки: на каждый тип машин допуск оформляется после отдельного обучения. Наличие допуска на внедорожные мотосредства (квадроциклы, снегоходы) и все остальные категории в подлинном удостоверении возможно, но встречается крайне редко.

Вышеперечисленные позиции контроля подлинности документа выполняются визуально или с помощью десятикратной лупы и позволяют, практически всегда, надёжно отличить подделку от оригинала.

В случае, если подозрения остаются, документ должен быть изъят и передан на экспертизу с помощью специализированных приборов для проверки в ультрафиолетовых и инфракрасных лучах разной длины волны, косопадающем и коаксиальном свете, в красном и зелёном свете и т.д. Всё это позволит надёжно выявить подделку и предотвратить катастрофические последствия попадания сложной техники в руки необученного персонала.

Чётко видно, что поддельные удостоверения напечатаны на обычной потребительской бумаге, которая светится в ультрафиолетовых лучах, так как содержит оптический отбеливатель. Образец при этом, напечатанный на специальной бумаге, остаётся темным.

При контроле в инфракрасных лучах (λ = 870 нм) текст подлинного удостоверения, напечатанный специальной краской, остался видимым, а на поддельном, напечатанный на принтере, пропал.

При необходимости аналогично контролируются водительские удостоверения, паспорта самоходных машин, паспорта транспортных средств, медицинские справки, паспорта, больничные листы и т.д.

Как это всё проконтролировать? Для этих целей промышленности России и Беларуси выпускают разнообразные приборы, которые давно вытеснили с рынка западные аналоги. Эти приборы, цена которых начинается с 500 российских рублей и доходит до нескольких сот тысяч рублей позволяют надёжно выявлять подделки, работают с компьютерами и по специализированным программам, сохраняют результаты контроля в виде фотографий [3].

Выводы

Для анализа документов, на которых есть многочисленные специальные признаки их подлинности, существует современное компьютеризированное оборудование контроля, но нет методик контроля конкретных документов и нет обученного персонала.

Опыт создания и внедрения таких методик имеется. В 2007 г. ГИБДД Санкт-Петербурга совместно с учёными СЗТУ, имеющими огромный опыт по разработке методик контроля разнообразных документов, разнообразные современные специальные компьютеризированные приборы и опыт обучения персонала, контролирующего в инстанциях различного уровня, разработали специализированную методику по обучению 22 станций технического осмотра с выдачей удостоверений о прохождении обучения государственного образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Павлов, И. В.** Контроль подлинности документов, ценных бумаг и денежных знаков / И. В. Павлов, А. И. Потапов. – М. : Техносфера, 2006. – 476 с.

2. **Павлов, И. В.** Подлинные или фальшивые – что мы знаем о наших документах / И. В. Павлов // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – № 2 (36). – С. 32–37.

3. **Павлов, И. В.** Подлинные или фальшивые – установление подлинности железнодорожных билетов / И. В. Павлов // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – № 3. – С. 53–55.

УДК 53.08 ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, А. И. СВИСТУН, А. Л. ЖАРИН, А. В. САМАРИНА

Белорусский национальный технический университет Минск, Беларусь

UDC 53.08

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF POLIMER COMPOSITE MATE-RIALS BY PROBE ELECTROMETRY TECHNIQUES K. Y. PANTSIALEYEU, A. K. TYAVLOVSKY, A. I. SVISTUN, A. L. ZHARIN, A. Y. SAMARINA

Аннотация

В работе приводятся методические и экспериментальные результаты исследований влияния светового воздействия на изменение электронной подсистемы полимерных композиционных материалов. В качестве средств контроля применен сканирующий зонд Кельвина. Методика контроля основана на анализе неоднородности электропотенциального профиля и пространственного распределения фото-ЭДС.

Ключевые слова:

сканирующий зонд Кельвина, контактная разность потенциалов, электростатический потенциал, фото-ЭДС, полимер.

Abstract

The paper describes methodical and experimental results of studies of the light action on the electronic subsystem of polymer composites. For monitoring, the Scanning Kelvin probe is used. An analysis of the electropotential profile heterogeneity and the surface photovoltage is the basis of the control technique.

Key words:

scanning Kelvin probe, contact potential difference, electrostatic potential, photovoltage, polymers.

Введение

Рассматриваемая в работе методика экспериментальных исследований полимерных композиционных материалов базируется на традиционных технологиях контроля и диагностики полупроводниковых материалов и промышленных изделий, основанных на комбинации методов контактной разности потенциалов (КРП) и фотоэмиссионных методов. Наиболее широкое распространение получили следующие технологии [1]: SPV-SKP (Surface Photovoltage Scaning Kelvin Probe), JPV-SKP (Junction Photovoltage Scanning Kelvin Probe), SPS (Surface Photovoltage Spectroscopy). Коммерческим производством таких систем занимаются всего несколько компаний: Semilab Co., Ltd. (Швеция), KP Technology, Ltd. (Великобритания), Semi-

conductor Diagnostics, Inc. и RCA Corporation (США). В НИЛ полупроводниковой техники БНТУ разработки в области приборов и методов зондовой электрометрии, а также методик неразрушающего контроля и диагностики прецизионных поверхностей полупроводников и металлов, в том числе для трибометрии, ведутся на протяжении более 20 лет.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что методы КРП применимы и к диэлектрическим материалам [2]. В случае диэлектриков контролируемым параметром является собственный и (или) приобретенный в результате внешних воздействий электростатический потенциал (заряд). Наличие в объеме и на поверхности диэлектрика потенциала оказывает существенное влияние на его механические, физико-химические, электрофизические и др. свойства. При этом в литературных источниках отмечается, что измерение конкретных физических параметров методами КРП затруднено из-за неоднозначности зависимости измерительного сигнала от комплекса физических и химических свойств контролируемого объекта. Информативность контроля может быть повышена путем использования дополнительных внешних воздействий на контролируемый объект, например, световое воздействие или заряжение в коронном разряде.

Целью работы является изучение закономерностей фотостимулированного изменения электронной структуры полимерных композитов методами зондовой электрометрии.

Материалы

Исследования проводили на образцах, изготовленных на базе полимерной матрицы полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 12203-250, промышленно выпускаемого заводом «Полимир» ОАО «Нафтан». Данная марка ПЭВД характеризуется высоким индексом текучести расплава (25 г/10 мин), поэтому применяется для получения концентратов красителей, т.е. высоконаполненных полимерных систем. Для получения образцов композитов в качестве наполнителей использованы углеродный наноматериал наночастицы диоксида кремния (YHM) И (SiO_2) . УНМ – продукт пиролиза углеродсодержащих газов в каталитическом кипящем слое, получаемый в лаборатории «Дисперсных систем» ИТМО НАН Беларуси. Предполагается, что наночастицы диоксида кремния способствуют ограничению агрегации УНМ и формированию более совершенного проводящего кластера в объеме полимерного образца.

Приборы и методы измерения

Экспериментальные исследования фотостимулированного изменения электронной подсистемы композитов проводили на специализированной сканирующей установке, разработанной в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ. Установка оснащена измерителем КРП (зонд Кельвина) по методу Кельвина–Зисмана [3] и источником оптического излучения, что позволяет, помимо измерения распределения потенциала, измерять поверхностную фото-ЭДС.

Система сканирования построена на основе трех линейных приводов перемещения. Приводы ориентированы по трем взаимно ортогональным направлениям. Два привода обеспечивают горизонтальное перемещение предметного столика с закрепленным на нем образцом. Третий привод обеспечивает вертикальное перемещение зонда Кельвина. Образец фиксируется на держателе с помощью вакуумного прижима. Закрепленная на приводе вертикального перемещения консоль, служит для монтажа зонда Кельвина и источника оптического излучения. Зонд Кельвина с помощью привода вертикального перемещения автоматически подводится к измеряемой поверхности на заданном удалении от нее. Процедура сканирования заключается в перемещении предметного столика, с закрепленным на нем образцом, с помощью двух приводов горизонтального перемещения.

Измерительный цикл выполняется в следующем порядке. После установки зонда над измеряемой поверхностью производится отсчет и запоминание значения КРП U_{CPD} . Затем на участок поверхности под зондом Кельвина воздействуют оптическим излучением. По достижении установившегося значения КРП источник оптического излучения отключается и результат измерения сохраняется. Далее осуществляется вычисление поверхностной фото-ЭДС U_{SPV} , как разность значений КРП до и после воздействия светом. Измерительный процесс полностью автоматизирован.

Результаты исследования

Результаты экспериментальных исследований образцов исходного ПЭВД марки 12203-250 и полимерного композита ПЭВД (97 мас. %) + УНМ (2 мас.%) + SiO₂ (1 мас.%) по параметрам пространственного распределения электростатического потенциала и фото-ЭДС представленны на рис. 1–4 соответственно.



Рис. 1. Электропотенциальный рельеф (*a*) и гистограмма пространственного распределения электростатического потенциала (*б*) образца исходного ПЭВД



Рис. 2. Визуализированное изображение (*a*) и гистограмма (*б*) пространственного распределения фото-ЭДС образца исходного ПЭВД

Обработка результатов включает построение карт и гистограмм пространственного распределения относительных значений электростатического потенциала и фото-ЭДС, определение математического ожидания значений потенциала и полуширины гистограммы распределения.



Рис. 3. Электропотенциальный рельеф (*a*) и гистограмма пространственного распределения электростатического потенциала (*б*) образца композита ПЭВД (97 мас.%) + УНМ (2 мас.%) + SiO2 (1 мас.%)



Рис. 4. Визуализированное изображение (*a*) и гистограмма (*б*) пространственного распределения фотоЭДС образца ПЭВД (97 мас.%) + УНМ (2 мас.%) + SiO2 (1 мас.%)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schroder, D. K. Semiconductor material and device characterization / D. K. Schroder. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 779 p.

2. Методы исследования полимеров на основе зондового картирования электростатического потенциала / К. В. Пантелеев [и др.] // Перспективные материалы и технологии: материалы Четвертого междунар. симпозиума, Витебск, 22–26 мая 2017 г. / Витеб. гос. техн. ун-т ; редкол. : В. В. Клубович (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2017. – С. 27–29.

3. Пантелеев, К. В. Построение измерителей контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.

E-mail: nilpt@tut.by

УДК 620.179.16

ОЦЕНКА ВЫСОТЫ НЕПРОВАРА СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

В. Ф. ПОЗДНЯКОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 620.179.16

ESTIMATE THE HEIGHT OF THE FUSION GAP OF BUTT WELDED JOINTS BY THE AMPLITUDE OF THE SIGNAL IN ULTRASONIC INSPECTION V. F. POZDNIAKOV

Аннотация

На основании проведенных исследований практически подтверждена возможность использования амплитуды отраженной ультразвуковой волны, как информативного параметра высоты плоскостных дефектов при ультразвуковом контроле стоковых сварных соединений.

Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, дефекты, амплитуда сигнала, сварные швы, высота непровара, контрольный образец, металлографические исследования.

Abstract

On the basis of the conducted research is almost confirmed-the possibility of using the amplitude of the reflected ultrasonic waves as informative parameter the height of the planar defects during ultrasonic testing of welded joints stock.

Key words:

ultrasonic inspection, defects, signal amplitude, welds, height of incomplete fusion, control sample, metallographic research.

Ультразвуковой (акустический) метод НК позволяет измерить значительное число характеристик дефектов и по величине, как самих характеристик, так и их соотношений (признаков дефектов) получить внушительный объем информации о выявленном дефекте [1]. Высокая информативность УЗК – одно из основных достоинств данного метода. По величине основных измеряемых характеристик (амплитуда сигнала, коэффициент выявляемости, координаты и условные размеры дефекта, эквивалентная площадь) производят разбраковку изделий, а по величине дополнительных измеряемых характеристик и соотношениям между измеряемыми характеристиками получают дополнительную информацию о виде, форме, ориентации, реальных размерах выявленных дефектов.

Решение последней задачи особенно актуально вследствие наличия двух известных факторов:

1) потенциальная опасность плоскостного дефекта на 1-2 порядка выше, чем объемного;

2) количество имеющих место объемных дефектов зачастую значительно превосходит количество плоскостных.

Вследствие этих двух причин система разбраковки только по основным измеряемым характеристикам обычно приводит к неоправданным потерям на ремонтные работы. Именно поэтому в течение многих лет ведутся активные исследования возможности оценки формы дефектов и разделения их на несколько классов – такую процедуру называют идентификацией дефектов. К настоящему моменту времени разработано и исследовано большое количество идентификационных признаков дефектов. Их можно разделить по:

 – частотной характеристике (измерение параметров спектра сигнала или моночастотного сигнала);

– природе используемых волн (отраженные, дифрагированные);

 типу используемых волн (продольные, поперечные или те и другие);

– количеству ПЭП (от одного до трех), используемых в измерениях;

– типу используемых в измерениях ПЭП (типовой наклонный, с переменным углом ввода луча типа «Парус» и т. д.);

– углу между направлением озвучивания и приема волн и пр.

В современных публикациях по УЗК такие признаки обычно разделяют на три группы [2, 3]:

1) основанные на измерениях условных размеров дефектов (эхо-метод);

2) основанные на определении акустического коэффициента формы (эхо-зеркальный метод);

3) основанные на регистрации сигналов, возникающих при дифракции ультразвуковых колебаний на дефекте (TOFD, дельта-метод, Ktl-метод).

Однако, использование вышеуказанных методов предполагает использование специальной аппаратуры и преобразователей. Значительно интереснее применение методов, позволяющих использовать типовую дефектоскопическую аппаратуру для ручного контроля.

Одним из таких методов является амплитудный, когда по величине амплитуды можно судить о какой-то определенной геометрической характеристике дефекта.

Использование данного метода предполагает проведение определенных исследований для конкретного типа сварного соединения, необходимых для корректной настройки аппаратуры и последующего контроля.

Рассмотрим применение данной методики на практике на примере реального объекта – наземного сосуда для хранения пропана-бутана фирмы Deltagaz GmbH Grafenhainichen, Deutschland. Данный сосуд имеет следующие характеристики: рабочее давление 1,56 МПа, объем корпуса 10 м³, диаметр обечайки 1240 мм, длина 7800 мм, толщина стенки 5,1 мм. Корпус сосуда сварен из пяти обечаек. Таким образом, имеется шесть кольцевых и пять продольных сварных швов.

Кольцевые сварные швы выполнены нестандартным методом. Внешний вид сварного соединения кольцевых швов показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид кольцевого сварного соединения сосуда для хранения пропана-бутана фирмы Deltagaz GmbH Grafenhainichen, Deutschland

Данное сварное соединение частично соответствует сварному соединению типа С11 по ГОСТ 8713-79.

На первом этапе при проведении ультразвукового контроля были обнаружены многочисленные дефекты в корне шва идентифицирующийся как непровары. Поскольку непровар является одним из наиболее опасных недопустимых дефектов, владельца сосудов интересовало конкретное численной значение высоты непровара с целью в дальнейшем проведения прочностных расчетов и оценки возможности эксплуатации сосудов.

Проведение таких работ было оправданно, поскольку таких сосудов в ведении заказчика насчитывалось в количестве 96 шт.

Кроме того, заказчик потребовал не нарушать наружное полимерное защитно-декоративное покрытие сосудов. Следовательно, контроль должен был проводиться с внутренней стороны сосуда.

С целью оценки реальной высоты непровара в корне сварных швов кольцевых соединений были проведены исследования зависимости амплитуды отраженного ультразвукового поля на стальных образцах толщиной 6 мм с поперечными пропилами прямоугольной формы разной глубины (рис. 2), имитирующие непровар в корне сварного шва.



Рис. 2. Внешний вид контрольного образца

Была построена экспериментальная зависимость (рис. 3) разности амплитуд отраженного сигнала от поперечного пропила и зарубки (1,4 х 0,8 мм – контрольный образец КО в соответствии с ОСТ 20-2044) при контроле преобразователем П121-70-5,0 на стальных образцах толщиной 6 мм при настроенном ВРЧ дефектоскопа УД2-102- «Пеленг».



Рис. 3. Зависимость разности амплитуд отраженного сигнала от высоты пропила контрольного образца и зарубки

Данная зависимость справедлива для непроваров обнаруженных прямым лучом преобразователя протяженностью не менее 8 мм и однократно отраженным лучом протяженностью не менее 10 мм.

Для подтверждения достоверности использованного метода измерения высоты непровара были проведены металлографические исследования натурного образца кольцевого сварного соединения, вырезанного из сосуда.

Образцы для исследования вырезаны поперек сварного соединения согласно схеме, представленной на рис. 4. Ширина каждого образца составляла около 15 мм, расстояние между ними (ширина реза) – 5 мм.

Контроль макроструктуры сварного соединения осуществлялся на поперечных шлифах. Металлографический шлиф захватывал зоны основного металла двух свариваемых листов, наплавленного металла сварного шва и зону термического влияния сварного шва (рис. 4). Контроль осуществлялся на 6 образцах, 5 из которых (№№1÷5) взяты из области шва с наибольшей величиной непровара в корне шва, выявленным методом ультразвукового контроля. Образец №6 представляет область шва, где непровар по данным УЗК отсутствует.

Исследования проводились в соответствии с ГОСТ 5640–68 при увеличениях от 8 до 100 крат непосредственно на подготовленных шлифах. Травление поверхности шлифов осуществлялось 4 %-ным раствором HNO3 в спирте. Исследование и получение электронной версии макроструктур сварного соединения осуществлялось на стереографическом микроскопе MБС-10.



Рис. 4. Схема разделки темплета сосуда СУГ с кольцевым сварным соединением для макроструктурных исследований

Для примера на рис. 5 представлены макроструктуры обследованных сварных соединений на отметках 88 мм, 95мм, 115 мм и 148 мм. На контрольных макрошлифах в зоне стыковки двух свариваемых листов присутствуют несплавления (непровары), уменьшающие фактическую толщину стенки обечайки сосуда. Величина непровара измерялась от наружной поверхности обечайки в направлении, перпендикулярном ей.

В табл. 1 представлены результаты замера величины этих непроваров в сравнении с результатами ультразвукового контроля.





Рис. 5. Макроструктура кольцевого сварного обечайки сосуда. Непровар в корне шва в виде несплавления: а – отметка 88 мм; б – отметка 95 мм; в – отметка 115 мм; г – отметка 134 мм

Из анализа приведенных результатов сравнительных испытаний видно, что разность оценки высоты непровара при проведении ультразвукового контроля и металлографических исследованиях не превышает 0,2 мм.

165

Таким образом, можно сделать вывод, что амплитуда отражённой ультразвуковой волны может быть с успехом использована как информационного параметра при определении высоты плоскостных дефектов.

Табл. 1. Результаты сравнительных измерений высоты непровара по результатам ультразвукового контроля и металлографических исследований

№ образца	Отметка по оси	Высота непровара, мм	
	шва, мм	УЗК	металлография
1	74	1,2	0,9
	88	1,3	1,2
2	95	1,0	0,8
	107	1,0	0,9
3	115	1.1	0,9
	128	1,4	1,25
4	134	1,3	1,3
	148	1,4	1,60
5	174	0,6	0,8
	187	0,7	1,00
6	273	0,1	0,15
	287	0,2	0,45 (пора)

По приведенной выше методики был проведен ультразвуковой контроль 26 сосудов СУГ с общей протяженностью сварных швов 811 м. Во всех кольцевых сварных швах сосудов были обнаружены дефекты идентифицирующийся как непровары высотой до 1,8 мм. В продольных сварных швах недопустимых дефектов не обнаружено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль : справочник в 7 т. / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – Т. 3. Ультразвуковой контроль. – 864 с.

2. Гурвич, А. К. Огибающие последовательности эхо-сигналов и их основные числовые характеристики / А. К. Гурвич. – Дефектоскопия. – 1975. – № 1. – С. 141–144.

3. **Щербинский, В.** Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В. Г. Щербинский. – М. : Тиссо, 2003. – 326 с.

УДК 535.37 ДЕФЕКТОСКОПИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЩЕЛОЧЬЮ РАСТВОРОВ КРАСИТЕЛЕЙ

В. И. ПОПЕЧИЦ

НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ Минск, Беларусь

UDC 535.37 DEFECTOSCOPY OF MATERIALS AND PRODUCTS USING MODIFIED ALKALI SOLUTIONS OF DYES V. I. PAPECHYTS

Аннотация

Исследовано влияние щелочных добавок в многокомпонентные растворы органических красителей на спектральные и цветоконтрастные характеристики растворов, используемых в качестве регистрирующих сред при радиационной дефектоскопии материалов и изделий. Показано, что скорость радиационной деструкции красителей в водных растворах под действием рентгеновского излучения возрастает при добавлении в растворы щелочи.

Ключевые слова:

радиационная дефектоскопия материалов и изделий, многокомпонентные растворы красителей, радиационная деструкция красителей.

Abstract

Influence of alkaline additives in multicomponent solutions of organic dyes on spectral and color contrast characteristics of solutions used as registering media for radiation defectoscopy of materials and products is investigated. It is shown that the rate of radiation degradation of dyes in aqueous solution under the influence of x-ray radiation increases when you add in solutions of alkalis.

Key words:

radiation inspection of materials and products, multicomponent solutions of dyes, radiation degradation of dyes.

Жидкие и твердые растворы органических красителей являются удобными модельными объектами для радиационных исследований, так как они обладают интенсивными полосами поглощения в оптической области спектра электромагнитных волн, и, следовательно, при изучении воздействия ионизирующих излучений на растворы красителей можно применять надежные, высокоинформативные оптико-спектральные методы [1, 2].

Спектральные и цветоконтрастные свойства растворов красителей зависят как от химической структуры молекул красителей, так и от физикохимических параметров жидкого растворителя или полимерной матрицы.

В многокомпонентных растворах красителей под действием рентгеновского или гамма излучения происходит изменение цвета раствора, вызванное радиационной деструкцией красителей, и зависящее от времени облучения, исходной концентрации раствора, химической природы красителей, физико-химических свойств используемого растворителя, спектрального состава и радиационной дозы ионизирующего излучения, что позволяет визуально определить величину радиационной дозы, используя соответствующую градуировочную цветовую шкалу. Первоначальный цвет многокомпонентного раствора определяется концентрацией каждого из входящих в раствор красителей. Наиболее простым многокомпонентным раствором является трехкомпонентный раствор, содержащий два красителя, имеющих длинноволновые полосы поглощения в разных спектральных областях видимого диапазона света, и растворитель. При воздействии ионизирующего излучения на растворы красителей происходит их необратимое обесцвечивание, вызванное изменением состава и структуры молекул красителей в результате взаимодействия последних с кислородсодержащими радикалами и ион-радикалами, образующимися вследствие радиолиза растворителя [3-5].

В данной работе на примере гидроксида калия – КОН исследовано влияние щелочных добавок на спектральные и цветоконтрастные характеристики визуализаторов ионизирующих излучений на основе трехкомпонентных растворов органических красителей (в качестве растворителя использовалась дистиллированная вода, в которой растворялись два красителя: один поглощал свет в длинноволновой области видимого диапазона длин волн, другой – в коротковолновой).

Сначала была исследована химическая стойкость к щелочи двухкомпонентных водных растворов красителей, перспективных для использования в качестве компонентов визуализаторов ионизирующих излучений. Концентрация растворов красителей составляла $3,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л. К 15 мл водного раствора красителя данной концентрации добавлялось 3 мл водного раствора КОН концентрации $2,5 \cdot 10^{-2}$ моль/л. Спектры поглощения растворов красителей, содержащие щелочную добавку, записывались через определенные промежутки времени на спектрофотометре PV 1251 «Solar». Точность измерения оптической плотности составляла 3 %. Чтобы исключить фотохимическую деструкцию красителей, растворы хранились при комнатной температуре в полной темноте.

В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости нормированной интенсивности длинноволновых максимумов спектров поглощения водных растворов некоторых красителей, содержащих щелочную добавку, от времени хранения растворов. Из этого рисунка видно, что по химической стойкости к щелочным добавкам красители можно условно разделить на три группы: относительно стойкие – концентрация исходного красителя со временем уменьшается незначительно (кривые 1, 2), среднестойкие (кривые 3, 4) и не стойкие (кривые 5, 6). Понятно, что для приготовления визу-

ализаторов ионизирующих излучений на основе многокомпонентных растворов красителей, активированных щелочными добавками, желательно использовать красители первой группы.

Для исследования влияния щелочных добавок на спектральные и цветоконтрастные характеристики облученных растворов были приготовлены трехкомпонентные водные растворы красителей. Смешивались 10 мл водного раствора красителя, поглощающего в длинноволновой области видимого спектра (концентрация 3,5.10⁻⁵ моль/л), и 10 мл водного раствора красителя, поглощающего в коротковолновой области, такой же концентрации. В полученный трехкомпонентный раствор добавлялись 4 мл воды или 4 мл водного раствора КОН концентрации 2,5·10⁻² моль/л соответственно. Облучение трехкомпонентных растворов, содержащих и не содержащих щелочную добавку, проводилось в пластиковых кюветах на рентгеновской установке «Дрон 2М», при мощности тока, проходящего через рентгеновскую трубку, 200 Вт (напряжение – 20 кВ, ток – 10 мА), при этом строго соблюдался одинаковый способ установки кювет, для того, чтобы обеспечивать одинаковые условия облучения каждого раствора. Облучение производилось в течение 15 минут. Затем на спектрофотометре PV 1251 «Solar» записывались спектры поглощения облученных растворов.



Рис. 1. Зависимость нормированной интенсивности поглощения в максимуме длинноволновой полосы (D/D_0) водного раствора Na-флуоресцеина (1); кислотного желтого светопрочного (2); акридинового желтого (3); трипафлавина (4); кислотного ярко-голубого 3 (5); родамина 6Ж (6) с добавлением щелочи от времени хранения раствора в темноте

В качестве примера на рис. 2 представлены спектры поглощения облученного трехкомпонентного раствора, содержащего и не содержащего щелочную добавку, из которого видно, что скорость радиационной деструкции красителей в растворе, содержащем щелочную добавку, возрастает. Это можно объяснить присутствием в растворе гидроксид-ионов, которые при радиолизе раствора образуют кислородсодержащие радикалы и ион-радикалы, обладающие высокой химической активностью. Взаимодействие последних с молекулами красителей приводит к нарушению π – электронной цепи сопряжения и смещению полос поглощения этих продуктов реакции в УФ-область спектра, что способствует уменьшению интенсивности длинноволновых полос поглощения растворов в видимой области спектра.

Полученные экспериментальные данные позволили сделать вывод о том, что скорость необратимой радиационной деструкции красителей в водных растворах возрастает при добавлении в растворы щелочи. Причем это возрастание скорости радиационной деструкции зависит от химической природы красителя, т.е. разное для каждого красителя.



Рис. 2. Спектры поглощения трехкомпонентного водного раствора метилового оранжевого ($\lambda_{max} = 470$ нм) и метиленового голубого ($\lambda_{max} = 665$ нм) после облучения рентгеном (1), с добавлением щелочи (2)

Следовательно, подбором красителей и добавлением в растворы щелочи или кислоты можно улучшить цветоконтрастные характеристики облученных растворов, что важно при применении трехкомпонентных растворов красителей в качестве регистрирующих сред для радиационной дефектоскопии материалов и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов, Б. И. Введение в химию и технологию органических красителей / Б. И. Степанов. – М. : Химия, 1977. – 448 с.

2. Левшин, Л. В. Оптические методы исследования молекулярных систем: в 2 ч. – Ч. 1: Молекулярная спектроскопия / Л. В. Левшин, А. М. Салецкий. – М. : Изд. МГУ, 1994. – 272 с.

3. **Попечиц, В. И.** Спектрально-люминесцентные характеристики гаммаоблученных растворов трикарбоцианиновых красителей / В. И. Попечиц // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2002. – № 3. – С. 33–37.

4. **Попечиц, В. И.** Влияние гамма-облучения на спектры поглощения растворов кислотных красителей / В. И. Попечиц // Журнал прикладной спектроскопии. – 2003. – Т. 70, № 1. – С. 34–37.

5. Попечиц, В. И. Визуализаторы ионизирующего излучения на основе многокомпонентных растворов красителей / В. И. Попечиц // Проблемы инженерно-педагогического образования в республике Беларусь : материалы VI междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. – Минск, 2012. – Ч. 2. – С. 128–133.

УДК 535.32: 621.378

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР МЕТОДАМИ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ И ВОЛНОВОДНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

И. У. ПРИМАК, А. В. ХОМЧЕНКО, А. Е. ДРАНИЦА, Н. И. КАЗАЧЕНКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 535.32: 621.378

PARAMETER TESTING OF THIN-FILM STRUCTURE BY REFLECTOMETRY AND WAVEGUIDE SPECTROSCOPY TECH-NIQUES

I. U. PRIMAK, A. V. KHOMCHENKO, A. E. DRANICA, N. I. KASACHENKO

Аннотация

Рассмотрены особенности и пределы применимости методов измерения параметров тонкопленочных структур, основанных на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка в схеме призменного возбуждения волноводных мод или его отражения от поверхности исследуемой структуры.

Ключевые слова:

волноводная спектроскопия, рефлектометрия, контроль параметров тонко-пленочной структуры.

Abstract

The waveguide and reflectometry techniques for measuring of the absorption coefficient, refractive index and thickness of dielectric and metal thin-film structures are discussed.

Key words:

waveguide spectroscopy, reflectometry, parameter testing of thin-film structure.

Оптические методы контроля параметров тонких пленок представляют практический интерес в технологии нанесения тонкопленочных структур различного функционального назначения. Традиционно для этого используется эллипсометрия [1]. В работах [2–5] продемонстрирована высокая чувствительность методов рефлектометрии и волноводной спектроскопии к вариациям параметров тонкопленочных структур.

В настоящей работе рассмотрены особенности и пределы применимости методов волноводной спектроскопии и угловой рефлектометрии для контроля параметров тонкопленочных структур. Указанные методы основаны на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка $R(\gamma)$ в схеме призменного возбуждения волноводных, вытекающих, плазмонных мод или его отражения от поверхности исследуемой структуры. При возбуждении волноводных мод в традиционной схеме, параметры которой приведены в [5], соответствующая зависимость $R(\gamma)$ для λ =633 нм представлена на рис. 1 (кривая 1). Аналогичное распределение регистрируется при возбуждении вытекающих мод в неволноводной тонкопленочной структуре (рис. 1, кривые 2, 3). Комплексная постоянная распространения возбуждаемых оптических мод зависит от оптических и геометрических параметров тонкопленочной структуры, что при соответствующей обработке [2] зарегистрированной зависимости $R(\gamma)$ позволяет определить их параметры. Структуры (рис. 1–3) были получены в ходе одного технологического цикла. Параметры аморфной пленки SiO_x на различных подложках, измеренные в случае волноводных и вытекающих мод, приведены в табл. 1.



Рис. 1. Угловая зависимость коэффициента отражения светового пучка при возбуждении оптических мод в тонкопленочной структуре SiO_x на подложке из кварцевого стекла (1), пленке SiO_x на подложке из стекла K8 (2) и кремния (3), пленке алюминия на подложке из стекла (4)

Погрешность измерения не превышает 1×10^{-4} для показателя преломления *n* и ~3% – для коэффициента поглощения *k* и толщины *d*.

Структура	п	$k, \times 10^{-5}$	<i>d</i> (мкм)
SiO _x /SiO ₂	1,47095	3,39	2,51
SiO _x /Si	1,47091	3,34	2,53

Табл. 1. Параметры пленки SiO_x на различных подложках

Одним из методов контроля параметров металлических слоев является ПЭВ-спектроскопия, также основанная на регистрации и обработке

угловой зависимости *R*(*γ*) при призменном возбуждении плазмонных мод (рис. 1, кривая 4). Благодаря локализации в окрестности поверхности металла ПЭВ крайне чувствительны к состоянию границы раздела, а также к наличию слоев, осажденных на поверхность металлической пленки. В работе представлены результаты измерения для пленок из алюминия и золота. Показано, что для пленок металла толщиной в диапазоне от 5 нм до 0,2 мкм, предлагаемый подход достаточно эффективен (погрешности восстановления параметров не превышают 10 %). При измерении параметров металлических пленок возможно отказаться от использования призмы связи в установке для волноводной спектроскопии. Принципиальная схема установки для измерения распределения $R(\alpha)$ приведена на рис. 2. Реализуемый в таком случае метод угловой оптической рефлектометрии, основанный на измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры, позволяет определить параметры (комплексный показатель преломления $n = x_2 + ix_3$ и толщина x_1) металлической пленки путем минимизации целевой функции $I = \sum_{j=1}^{n} \left[f(x_i, \gamma_j) - R(\gamma_j) \right]^2$, где $f(x_i, \gamma_j)$ – рассчитанные значения параметров на основе используемой модели. Представленные на рис. З угловые зависимости коэффициента отражения излучения пучка Не-Ne лазера ТМ-поляризации, измеренные при его отражении от осажденных методом термического напыления на подложку слоев алюминия различной толщины, иллюстрируют эффективность предлагаемого подхода.



Рис. 2. Схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения лазерного пучка: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – делитель пучка; 4 – аттенюатор; 5 – поляризатор; 6 – линза; 7 – тонкопленочная структура на подложке 8; 10 – поворотный столик; 11 и 12 – фотоприемники; 14 и 15 – шаговые двигатели; 16 – блок синхронного управления шаговыми двигателями; 17 – блок сравнения каналов; 18 – АЦП; 19 – компьютер

Следует отметить, что данная техника позволяет контролировать и состояние поверхности металлического слоя.



Рис. 3. Зависимость $R(\gamma)$ для пленки алюминия толщиной 2, 3, 5, 18 и 26 нм (кривая 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно)

Метод угловой рефлектометрии представляет также интерес для определения параметров наноразмерных диэлектрических структур. Он основан на многоугловом измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры и последующей оценке необходимых параметров с помощью метода наименьших квадратов (МНК) при минимизации суммы квадратов невязок:

$$S(\mathbf{z}) = \sum_{\rho=1}^{2} \sum_{i=1}^{n} \left(R_i^{e} - R(\rho, \gamma_i, \mathbf{z}) \right)^2,$$

где R_i^e – измеренное значение коэффициента отражения света, имеющего поляризацию ρ , при угле падения света γ_i , отсчитанном от нормали к поверхности слоистой структуры ($i = \overline{1,n}$); $R(\rho, \gamma_i, \mathbf{z})$ – рассчитанное значение коэффициента отражения на основе предполагаемой модели диэлектрической проницаемости структуры; $\mathbf{z} = (\varepsilon, d)$ – комплекс неизвестных параметров структуры, которые необходимо оценить (в нашем случае диэлектрическая проницаемость и толщина слоя SiO₂), n – количество углов, при которых производится измерение. Результаты измерений и численного моделирования отражения света от структуры с учетом погрешностей регистрации коэффициента отражения (δR ~0,005) и решения обратной задачи определения параметров структуры показывают, что определение параметров слоев может быть достаточно точным при d > 0,05 мкм. Более высокой чувствительности и точности определения указанных параметров можно достигнуть при использовании, так называемой, призменной схемы измерения (призма, приведенная в контакт с исследуемой структурой). Это подтверждают результаты измерений и численного моделирования отражения света от призмы, приведенной в контакт со структурой Si-SO₂. В качестве буферного слоя использовался иммерсионный слой. Толщина буферного слоя 0,1 мкм определялась также с помощью МНК с погрешностью менее 5 %.

Аналогичные исследования отражения света от призмы с металлическим (Au) слоем показало, что восстановление параметров слоя SiO_2 эффективно при его толщинах больших 0,05 мкм. Погрешности восстановления менее 6 % достигаются при оптимальной толщине слоя Au ~ 0,03 мкм.

В рамках задачи восстановления распределения толщины d(x,y) слоя SiO₂ промоделировано отражение света от неоднородного слоя, расположенного на кремниевой подложке (рис. 4). При этом предполагалось, что данное распределение описывается функцией Гаусса (рис. 4, а).

a)



Рис. 4. Распределения толщины (а) слоя SiO_2 и соответствующего коэффициента отражения (б)

Для определения распределения *d*(*x*,*y*) использована аппроксимация распределения толщины слоя многочленами Чебышева

$$\overline{d} = k_0 d(x, y) = \sum_{k=0}^{r} \sum_{l=0}^{s} C_{k,l} G_k(\overline{x}) T_l(\overline{y}), \ \overline{x} = x / a_x, \quad \overline{y} = y / a_y, \quad (1)$$

где $G_k(\bar{x})$ $(k = \overline{0,r})$ и $T_l(\bar{y})$ $(l = \overline{0,s})$ – многочлены Чебышева; k_0 – волновое число вакуума; a_x и a_y – некоторые масштабные факторы. Неизвестные коэффициенты $C_{k,l}$ $(k = \overline{0,r}, l = \overline{0,s})$ определяются при минимизации функционала

$$I = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{i=1}^{n_y} (R_{j,i}^e - R^t(\overline{d}_{j,i}))^2, \ \overline{d}_{j,i} = k_0 d(x_j, y_i) .$$
(2)

Аппроксимация для отдельных сечений поверхности d(x, y) выполнена в виде

$$\overline{d}_{x} = k_{0}d(x, y_{0}) = \sum_{k=0}^{r} A_{k}G_{k}(\overline{x}), \quad y_{0} = y_{i_{0}}, \quad (3)$$

ИЛИ

$$\overline{d}_{y} = k_{0}d(x_{0}, y) = \sum_{l=0}^{s} B_{l}T_{l}(\overline{y}), \quad x_{0} = x_{j_{0}}.$$
(4)

Неизвестные коэффициенты A_k ($k = \overline{0, r}$) и B_l ($l = \overline{0, s}$) определяются при минимизации соответственно следующих функционалов:

$$I(y_{i_0}) = \sum_{j=1}^{n_x} (R_{j,i_0}^e - R^t(\overline{d}_{j,i_0}))^2, \ \overline{d}_{j,i_0} = k_0 d(x_j, y_{i_0}),$$
(5)

$$I(x_{j_0}) = \sum_{i=1}^{n_y} (R^e_{j_0,i} - R^t(\overline{d}_{j_0,i}))^2, \ \overline{d}_{j_0,i} = k_0 d(x_{j_0}, y_i).$$
(6)

$$I(y_{i_0}) = \sum_{\rho=0}^{1} \sum_{j=1}^{n_x} (R_{\rho,j,i_0}^e - R^t(\rho, n, d_{j,i_0}))^2 , I(x_{j_0}) = \sum_{\rho=0}^{1} \sum_{i=1}^{n_y} (R_{\rho,j_0,i}^e - R^t(\rho, n, d_{j_0,i}))^2$$

На рис. 5, а представлены результаты моделирования отражения света от неоднородного слоя SiO₂, распределенного по закону $\bar{d} = \bar{d}_0 + a \exp(-(\bar{x}/w)^2)$ (w = 300, 500, 700 на рис. 5, b, соответственно, представлены кривыми 1, 3, 5).



Рис. 5. Распределения коэффициента отражения (а) и толщины слоя SiO_2 (b)

Результаты восстановления распределения на рисунке 5, b представлены кривыми 2, 4, 6. Погрешность определения d не превышала 10 %.

Таким образом, метод исследования оптических свойств тонких пленок, основанный на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка при возбуждении мод оптического диапазона, и метод угловой оптической рефлектометрии применимы для контроля и измерения параметров тонкопленочных структур, используемых в оптике и микроэлектронике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ржанов, А. В.** Основы эллипсометрии / А. В. Ржанов. – Новосибирск : СО Наука, 1979.

2. Сотский, А. Б. [и др.] // ЖТФ. – 2013. – Т. 83, вып. 11. – С. 105–110.

3. Соколов, В. И. Квант / В. И. Соколов [и др.] // Электроника. – 2013. – Т. 43. – № 12. – С. 1149.

4. Алиев, И. М. [и др.] // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 10. – С.145–147

5. **Khomchenko, A. V.** Waveguide spectroscopy of thin films / A. V. Khomchenko. – New York : Academic Press. – 2005.

E-mail: avkh@mogilev.by

УДК 620.179.16 **ДЕФЕКТОСКОПИЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ**

В. И. ПУДОВ, А. С. СОБОЛЕВ

НИУ «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН» Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.16 DEFECTSOSCOPY OF STEEL CANANTS V. I. PUDOV, A. S. SOBOLEV

Аннотация

Рассмотрена возможность оптимизации настроечных параметров магнитного дефектоскопа, предназначенного для контроля стальных канатов, с помощью имитационных образцов, соответствующих 10, 15, 20 и 25% износу канатов.

Ключевые слова:

контроль канатов, ферромагнитные имитаторы, настройка.

Abstract

The possibility of optimizing the tuning parameters of a magnetic flaw detector intended for controlling steel ropes is considered using imitators samples corresponding to 10, 15, 20 and 25% rope wear.

Key words:

rope control, ferromagnetic imitators, tuning, flaw detector.

Стальные канаты и тросы подвержены многократным статическим и динамическим нагрузкам. Наиболее перспективное направление их контроля связано с магнитным методом. Например, с разработкой образцов, имитирующих разную степень износа канатов. Такой износ обеспечивается изменением площади поперечного сечения образцов. В частности, при поверке магнитных дефектоскопов «Интрос» используют образцы ИК-МДК в виде набора из стальных калиброванных проволок с разной площадью поперечного сечения [1]. Они изготовлены из материала соответствующего материалу и типоразмерам конкретных канатов.

Однако такие образцы исследуются в статическом состоянии и не соответствуют в полной мере изменениям свойств материала канатов в условиях эксплуатации.

Предлагаемое в работе решение связанно с разработкой комплектов имитационных образцов в виде стандартных образцов (СО), полученных термообработкой их материала по специальному режиму. СО предназначены для настройки и поверки магнитных дефектоскопов типа УДК-3, используемы для контроля износа стальных круглых, плоских и резинотросовых канатов.

В УДК-3 намагничивание стальных образцов осуществляется в катушке его датчика переменным магнитным полем частотой 200 Гц и разной амплитудой (например, 50 А/м для плоских и резинотросовых канатов, 160 А/м для круглых стальных канатов). Их магнитное поле рассеяния, воздействуя на измерительную катушку датчика, формирует магнитный поток ($\Phi=\Phi_a \sin(2\pi f_a t)$, где Φ_a и f_a - соответственно, амплитуда и частота переменного магнитного потока; *t*-текущее время), который индуцирует регистрируемую ЭДС ($\varepsilon=-d\Phi/dt$), передаваемую на индикаторную шкалу, показывающую износ образца в процентах. Например, для СО амплитуда Φ_a зависит от параметров образца и переменного магнитного поля ($\Phi_a \sim \mu_o \mu_a H_a S$, где $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ_a – амплитуд-ная магнитная проницаемость образца; H_a – амплитуда напряженности переменного магнитного поля; *S* – площадь поперечного сечения образца).

Разработка СО с существенно меньшими μ_a по сравнению с аналогичными для контролируемых канатов μ_a^k значительно повышает требования к характеристикам дефектоскопов, которые после настройки по этим образцам приобретут значительный запас по чувствительности и более стабильный режим работы. Например, используемые для канатов стали 6Х19, 6Х30, 18Х19 имеют разброс по μ_a^k в интервале 30–60 ед. [2]. В этом случае можно ограничиться применением СО с μ_a на уровне 20 ед. СИ, в результате создается запас по чувствительности не менее чем в 1,5 раз, что в последующем позволяет практически исключить зависимость результатов контроля от сложных условий эксплуатации и влияния магнитных свойств применяемых сталей.

Для СО выбрана инструментальная сталь марки У8. В образцах использовали прутки, для которых μ_a составляла 40–45 ед. СИ. Они имели диаметры 1 и 5 мм, а длину – 1200 мм, которая превышала в 3–4 раза линейные размеры рабочего объема датчиков УДК-3, что позволило исключить влияния краевых эффектов. При термообработке прутков по специальному режиму их μ_a была уменьшена примерно в 2 раза.

Исследование магнитных характеристик прутков проводили на базе установки УВТ 82-А-93 (аттестационное свидетельство №58-06/262 от 10. 07. 2006 г.) и разработанного устройства со специальной магнитной системой, имитирующего режим работы дефектоскопа. Оно состояло из соленоида 40х740 мм. Расчет его постоянной показал значение κ_c =790 1/м.

Через соленоид пропускали от генератора тока, с последующим усилением, переменный ток с частотой 200 Гц, который формировал воздействующее на прутки магнитное поле амплитудой 50 и 160 А/м. В результате воздействия магнитного поля прутков на измерительную обмотку, в ней формировался магнитный поток, который индуцировал регистрируемую ЭДС, соответствующую изменению потока от потери суммарной площади поперечного сечения прутков (то есть от их износа).

Для создания СО отбирали прутки с многократным измерением микрометром их диаметров (d) и определением средних значений d_{c_i} а также определением среднего значения площади поперечного сечения прутка
$$S_{\rm c} = \pi \cdot (d_{\rm c}^{2})/4 = \pi \cdot (\Sigma_{\rm i}^{\rm n} \Sigma_{\rm j}^{\rm m} d_{\rm ij})^{2}/4, \qquad (1)$$

где d_{ij} – *i*-ое значение диаметра в *j*-ом месте прутка; *n*, *m* – соответственно, число измерений диаметра в данном месте прутка и количество мест измерений по длине прутка (*n*, *m* должно быть не менее 3).

При разных значениях ЭДС, измеряли вольтметром эффективное напряжение (U_3) на измерительной обмотке и оценивали μ_a прутка

$$\mu_{a} = \frac{U_{a}}{\mu_{o} S_{c} dH/dt} , \qquad (2)$$

где *H* – напряженность переменного магнитного поля, формируемого прутком.

В результате было отобрано более 100 прутков с μ_a от 19 до 21 ед. СИ. Из них сформировали 5 образцов в виде пучков. Образцы имитировали круглые канаты без износа сечения (0 %) и 10 %, 15 %, 20 % и 25 % износ.

Площади среднего сечения пучков образца Sc^o определяли по формуле

$$S_{\rm c}^{\rm o} = N \cdot S_{\rm c} , \qquad (3)$$

где *N* – число прутков в пучке.

Для этих 5 образцов определены U_3 при двух амплитудах переменного магнитного поля H_a =50 и 160 А/м. В результате были получены СО для трех типов стальных канатов.

В табл. 1 приведены данные о комплектах СО для круглых, плоских и резинотросовых стальных канатов. Из неё видно, что, комбинируя прутки по их числу и диаметру можно получить необходимые площади поперечного сечения СО отражающих износ всех трех типов канатов.

При исследовании уже СО из пучка прутков определение амплитуды переменного магнитного поля $H_a^{\ c}$ производили по формуле

$$H_{\rm a}^{\rm c} = k_{\rm c} \cdot I = k_{\rm c} \cdot \left[\left(2^{1/2} U_{\rm g}^{\rm c} / 1, 111 \right) / R \right], \tag{4}$$

где I – ток в намагничивающей обмотке; R – величина сопротивления магазина Р4830/1 (R=10 Ом); U_3^c – измеряемое вольтметром напряжение на клеммах магазина Р4830/1; 1,111 – коэффициент пересчета U_3^c в среднее напряжение U_c).

		-				
Тип	Обозначе-	Число прутков в		Σ площадь	Уменьшение сече-	
канатов	ние ком-	CO		поперечного	ния СО (имитация	
	плектов	$d = 5_{MM}$ $d = 1_{MM}$		сечения СО,	износа), %	
	CO			MM ²		
Круглые	МП1-1	20	-	392,8	1,000	
	МП1-2	18	1	354,2	0,902	
	МП1-3	17	1	334,6	0,852	
	МП1-4	16	1	315,0	0,802	
	МП1-5	15	-	294,5	0,750	
Плоские	МП 2-1	38	-	746,1	1,000	
	МП2-2	34	-	667,6	0,895	
	МП2-3	32	-	628,3	0,842	
	МП2-4	30	-	589,1	0,790	
	МП2-5	28	-	559,6	0,736	
Резино-	МП3-1	52	-	1021,0	1,000	
тросовые	МП3-2	47	-	922,8	0,904	
	МП3-3	44	-	863,9	0,846	
	МП3-4	42	-	824,7	0,808	
	МП3-5	39	-	765,7	0,750	

Табл. 1. Комплекты СО для круглых, плоских и резинотросовых стальных канатов

Для каждой амплитуды H_a^c (4) определяли по 10 наблюдениям среднюю величину амплитуды переменного магнитного потока Φ_a^c [3]

$$\Phi_{a}^{c} = U_{3}^{c} / 4,444 \cdot W_{2} f, \tag{5}$$

где W_2 – число витков измерительной катушки; f – частота переменного намагничивающего магнитного поля.

С другой стороны из (2) следует, что U_3^{c} связано с площадью поперечного сечения образца. Тогда согласно (5) и (2) отношение амплитуд $\Phi_a^{c^*}$ переменных магнитных потоков для образцов с уменьшенным поперечным сечением $S_c^{o^*}$ к амплитуде Φ_a^{c} образца с исходным сечением S_c^{o} может быть записано в виде

$$\Phi_{a}^{c^{*}} / \Phi_{a}^{c} = U_{9}^{c^{*}} / U_{9}^{c} \sim S_{c}^{o^{*}} / S_{c}^{o}, \qquad (6)$$

где $U_3^{c^*}$, U_3^{c} – эффективные напряжения, соответственно, для образцов с уменьшенным $S_c^{o^*}$ и исходным S_c^{o} поперечными сечениями.

В табл. 2. приведены результаты исследований комплектов СО. Видно что отношение амплитуд переменных магнитных потоков для СО с износом к амплитуде исходных СО без износа, находится в пропорциональной зависимости с отношением исправленных средних значений напряжений U_3^{c**}/U_3^{c} , связанных с площадями сечений СО.

	1						
Обозначе-	е- Средние значения парамет-			Сред-	Амплитуда	Отношения	
ние ком-	ров нам	магничи	вающего поля		ние зна-	магнитного	амплитуд
плектов	160 А/м		50 А/м		чения	потока ${\Phi_{a}}^{c}$	$CO \Phi_a^{c^*} / \Phi_a^{c}$
CO	Н _а ^с , А/м	f, Гц	Н _а ^с ,А/м	f, Гц	$U_{\mathfrak{I}}^{\mathfrak{c}^{**}}$, MB	мкВб	от. ед.
МП 1-1	160,2	200,2	-	-	68,8	77,5	1,0
МП 1-2	160,0	199,8	-	-	61,7	69.5	0,897
МП 1-3	159,8	200,0	-	-	58,5	66,0	0,851
МП 1-4	160,1	200,3	-	-	54,7	61,6	0,795
МП 1-5	159,9	200,0	-	-	51,2	57,7	0,744
МП 2-1	-	I	50,2	199,9	40,3	45,3	1,0
МП 2-2	-	I	50,3	200,2	35,8	40,2	0,889
МП 2-3	-	I	49,9	200,0	33,7	37,9	0,837
МП 2-4	-	I	50,0	198,8	31,8	35,6	0,788
МП 2-5	-	-	50,1	200,1	29,8	33,4	0,739
МП 3-1	-	-	49,8	200,1	55,1	62,0	1,0
МП 3-2	-	-	50,1	200,0	49,6	55,8	0,900
МП 3-3	-	-	50,0	200,2	46,6	52,4	0.845
МП 3-4	-	-	50,2	200,1	44,5	50,0	0,807
МП 3-5	-	-	49,9	199,8	41,4	46,6	0,751

Табл. 2. Физические параметры комплектов СО

*Исправленные значения $U_3^{c^{**}}$ получены введением вышеприведенных поправок СО МП-1 для круглых канатов; СО МП-2 для плоских канатов; СО МП-3 для резинотросовых канатов.

Исправленные значения $U_3^{c^{**}}$ получены введением 2-х поправок. Первая поправка со знаком минус обусловлена меньшим единицы коэффициентом заполнения СО с поперечным сечением S_c^{o} площади внутреннего поперечного сечения соленоида (S_c^{B}) намагничивающей системы и оценивается по формуле

$$\Delta U_1 = -U_3^{\,\rm c} \cdot (1 - (S_c^{\,\rm o} / S_c^{\,\rm B})). \tag{7}$$

Из (6) следует, что с уменьшением S_c^{o} поправка по абсолютному значению возрастает.

Вторая поправка обусловлена уменьшением коэффициента размагничивания при снижении площади (S_c°) СО при его одинаковой длине, определяемой длиной соленоида (l_s). Она представлена в виде

$$\Delta U_2 = -(1-K) \cdot U_3^{\,\mathrm{c}},\tag{8}$$

где *К* – поправочный коэффициент, зависящий от $\lambda = l_s/2(S_c^{0}/\pi)^{\frac{1}{2}}$ [4–6].

Зависимость поправочного коэффициента (*K*) от λ приведена на рис.1.

Из рис. 1 видно, что с ростом λ , то есть при уменьшении S_c^{o} , K отклоняется от единицы в меньшую сторону. Это приводит к завышению $U_3^{c^{**}}$ по отношению значению U_3^{c} для исходного (не уменьшенного) значения S_c^{o} . Поэтому согласно (8) эта поправка вводится со знаком минус.



Рис. 1. Зависимость поправочного коэффициента К от параметра λ

Эффективность применения разработанных комплектов стандартных образцов была подтверждена испытанием дефектоскопов УДК-3 в практических условиях эксплуатации канатов в составе шахтного оборудования [7–9].

Таким образом, магнитный контроль износа стальных канатов посредством дефектоскопов типа УДК-3, калиброванных с помощью разработанных СО существенно повышает возможности магнитного метода дефектоскопии при контроле стальных канатов.

Работа выполнена по бюджетной теме «Диагностика», №01201463329.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов подъемных сооружений. – М. : Изд. СП «Интрон Плюс», 2000. – 19 с.

2. Марочник сталей и сплавов / Под ред.. В. Г. Сорокина. – М. : Машино-строение, 1989. – 640 с.

3. **Чечерников, В. И.** Магнитные измерения / В. И. Чечерников. – М. : Изд. МГУ, 1963. – 285 с.

4. **Янус, Р. И.** Магнитная дефектоскопия / Р. И. Янус. – М.-Л. : ОГИЗ Гостехиздат, 1946. – 171 с.

5. Соболев, А. С. О возможности оптимизации настроечных параметров магнитных дефектоскопов / А. С. Соболев, В. И. Пудов, В. П. Малюк // Дефектоскопия. – 2009. – № 12. – С. 83–87.

6. Пудов, В. И. Измерение физических параметров образцов-имитаторов / В. И. Пудов, А. С. Соболев, С. В. Воронина // Измерительная техника. – 2010. – № 5. – С. 54–57.

7. Пат. № 96979 РФ, МПК8 G01N 27/82. Устройство для калибровки магнитных дефектоскопов / В. И Пудов, А. С. Соболев ; заявитель и патентообладатель ИФМ УРО РАН. – Бюл. изобр. №23. – 2 с.

8. Пат. №2455635 РФ, МПК8 G01N 27/82. Способ изготовления имитаторов потери сечения стальных канатов / В. И. Пудов, А. С. Соболев ; заявитель и патентообладатель ИФМ УРО РАН. – Бюл. изобр. №19. – 2 с.

9. Соболев, А. С. Повышение эффективности магнитного контроля стальных шахтных канатов / А. С. Соболев, В. И. Пудов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : тез. докл. VIII Российской науч.-техн. конф. 2014. – Екатеринбург : ООО Издательство УМЦ УПИ, 2014. – 202 с.

E-mail: pudov@imp.uran.ru

УДК 620.179

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ШВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК И УНИВЕРСАЛЬНОГО СКАНЕРА

С. С. СЕРГЕЕВ, С. Л. МЕЛЬНИКОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 620.179

FEATURES OF ULTRASONIC TESTING OF WELDED SEWING WITH THE USE OF PHASED GRIDS AND UNIVERSAL SCANNER S. S. SERGEEV, S. L. MELNIKOV

Аннотация

Рассмотрены вопросы совершенствования технологии ультразвукового контроля сварных соединений на основе применения дефектоскопов с фазированными антенными решетками. Проведены теоретические и экспериментальные исследования и показаны возможности обеспечения равномерности чувствительности при контроле сварных швов в заданном диапазоне углов ввода.

Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, фазированная решетка, чувствительность, сканер.

Abstract

The problems of improving the technology of ultrasonic testing of welded joints based on the use of flaw detectors with antennas phased grids are considered. Theoretical and experimental studies have been carried out and the possibilities of ensuring the uniformity of sensitivity in the control of welded joints in a given range of input angles are shown.

Key words:

ultrasonic testing, phased grids, sensitivity, scanner.

Ультразвуковые системы с фазированными решетками потенциально могут использоваться практически для любого неразрушающего контроля, где традиционно использовались обычные ультразвуковые дефектоскопы. Осмотр результатов сварки и обнаружение трещин являются наиболее важными практическими задачами, и эти испытания проводятся во многих отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, энергетическую, нефтехимическую, при поставке металлических заготовок и трубной продукции, строительстве и эксплуатации трубопроводов.

Преимущества технологии фазированных решёток перед обычными ультразвуковыми преобразователями (ПЭП) состоят в ее возможности использовать несколько элементов, чтобы управлять, фокусировать, и сканировать объект посредством одного преобразователя. Это значительно

упрощает обследование объектов со сложной геометрией. Небольшой размер преобразователя и возможность перемещать луч без перемещения ПЭП, также помогает осмотру таких объектов в ситуациях, где есть ограниченный доступ для механического сканирования. Секторное сканирование, как правило, используется для контроля сварного шва. Возможность проверить швы с различными углами ввода ультразвука одним преобразователем значительно увеличивает вероятность обнаружения различного рода аномалий. Электронная фокусировка оптимизирует форму и размер пучка в предполагаемом месте дефекта, что существенно повышает вероятность его обнаружения. Возможность сосредоточиться на нескольких глубинах улучшает возможность оценки критических дефектов при объемном прозвучивании. Фокусировка может значительно улучшить отношение сигнал-шум в сложных случаях, а электронное сканирование от многих групп элементов позволяет быстро создать изображения Sразвёртки. Возможность одновременного прозвучивания с разными углами ввода и сканирование большой площади образца линейным перемещением ПЭП увеличивает скорость проверки. Контроль преобразователем с фазированной решёткой в несколько раз производительнее традиционной проверки с обычным ультразвуковым преобразователем.

Технология контроля с использованием в качестве преобразователя линейной фазированной решетки основана на возможности программного управления акустическим полем излучения при сканировании объекта. При этом преобразователь выполняет функции излучателя с переменным углом ввода, т. е. обеспечивается качание луча в определенном угловом диапазоне в вертикальной плоскости. Таким образом, можно сформировать секторную развертку (S-скан), на которой отображается вертикальное сечение объекта контроля с кодированием амплитуды эхо-сигналов от различных неоднородностей с определенной цветовой гаммой. Кроме возможности секторного сканирования при неподвижном преобразователе имеется возможность управления диаграммой направленности излучателя, т. е. возможность изменения фокусного расстояния и размеров фокусного пятна.

Практическое применение данной технологии при контроле сварных швов различного типа показало реальное ее преимущество перед традиционным зхоимпульсным методом:

– преобразователь с линейной решеткой может обеспечить сканирование в диапазоне углов $\pm 20^{\circ}$ с равномерностью чувствительности не хуже 6дБ;

 применение наклонных призм в качестве формирующих линий задержки обеспечивает расширение диапазона углов ввода в объект контроля продольных или сдвиговых волн, что облегчает обнаружение разноориентированных дефектов; возможность фокусировки звукового пучка на различных расстояниях позволяет повысить чувствительность контроля и фронтальную разрешающую способность и выявлять мелкие неоднородности;

– траектория сканирования объекта существенно упрощается и сокращается по длине, т. е. фактически достаточно при толщинах основного металла до 30 мм проводить перемещение ПЭП вдоль шва по одной линии;

 современные дефектоскопы позволяют записывать полученные развертки в реальном времени и формировать отчеты по контролю в виде изображений, что удобно для оператора при оценке качества контролируемого объекта.

Существенным преимуществом применения фазированных решеток является сокращение затрат на подготовку контактных поверхностей объекта, что повышает производительность контроля. Особенно это проявляется при обследовании объектов в период эксплуатации, когда металлические поверхности подвергаются коррозии и загрязнениям.

Наряду со всеми указанными выше преимуществами технологии есть ряд негативных моментов, которые должны быть учтены при проведении контроля. Следует отметить, что независимо от типа отражателя на амплитуду эхо-сигналов от одинаковых экранов, расположенных в пределах прозвучиваемого поперечного сечения и озвучиваемых способом секторного сканирования, влияют несколько факторов, причем степень влияния каждого из них зависит от реализуемого угла ввода:

– эффективный размер активной апертуры преобразователя;

– расстояние от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча;

– затухание в призме (изменение длины хода луча по призме);

– коэффициент прозрачности по энергии на границе призма-объект;

– длина хода луча по контролируемому материалу.

Для обеспечения равномерности чувствительности в пределах диапазона углов качания пучка при секторном сканировании требуется компенсация зависимости амплитуды эхо-сигнала от всех упомянутых факторов. Это может быть достигнуто расчетными, методическими и аппаратными средствами при настройке дефектоскопа.

При внедрении фазированных антенных решеток (ФАР) в производство появилась проблема реализации некоторых требований, предъявляемых к традиционным методам УЗК. Одной из проблем является вынужденная ограниченность количества применяемых фокальных законов, следствием чего является неравномерность чувствительности прибора по полю изображения.

Например, необходимо проконтролировать зону 40 х 50 мм, для этого при шаге визуализации 1 мм нужно использовать 2000 фокальных законов. Учитывая, что производительность визуализации должна быть не менее 20...30 кадров в секунду, количество операций получается слишком большим для современной вычислительной техники. Поэтому для получения приемлемой частоты обновления экранного изображения в каждом режиме работы прибора на ФАР обычно используется намного меньшее число фокальных законов. И, как следствие, в изображении только небольшая зона воспроизводится с максимальной чувствительностью к отражателям и наилучшим пространственным разрешением. Вне этой зоны характеристики хуже, и чем дальше от нее, тем еще хуже. Если прибор откалибровать по чувствительности в зоне наилучшего качества изображения, то в оставшейся рабочей области калибровка не будет выполняться.

Именно по этим причинам технология фазированной решётки до сих пор является вспомогательной, позволяющей выявить дефекты и оценить их примерные размеры, а также наглядно и удобно для восприятия их визуализировать. Точная оценка размеров дефектов при использовании метода фазированных решеток возможна лишь при фокусировке ультразвука в месте дефекта в момент его нахождения по А-скану, что фактически не отличается от традиционных методов контроля.

По действующим нормативным документам по проведению УЗК оценку качества изделий осуществляют по эквивалентной отражающей способности несплошности с применением АРД-диаграмм.

Сложность экспериментально АРДприменения построенных диаграмм для ФАР заключается в необходимости настройки на множестве одинаковых отражателей, выявленных под разными углами. В Беларуси для настройки чувствительности приняты плоскодонные отражатели, что вызывает определенные сложности для создания АРД диаграмм. Так для настройки чувствительность даже для ограниченного числа углов из сектора от 30 до 70 градусов, например, с шагом 5 градусов потребуется 8 паспортизированных образцов, содержащих набор одинаковых плоскодонных отражателей на разных глубинах. Кроме того, сложность заключается и том, что из-за наличия фокусировки зависимость между площадью плоскодонного отражателя и его амплитудой перестает быть линейной, поэтому для достоверной оценки отражающей способности несплошностей, превышающих 1...2 длины волны, потребуется еще набор образцов с плоскодонными отражателями, имеющими разные площади.

В связи с этим для настройки чувствительности есть смысл использовать теоретические АРД-диаграммы, рассчитанные по формулам акустического тракта для каждого угла ввода. Например, уравнение акустического тракта при контроле сварных соединений для дискового отражателя площадью S_b с переменным углом ввода имеет следующий вид:

$$|A(r_N, \alpha_N)| = \frac{S_b \times S_a \times \cos\alpha_N}{\lambda^2 \times (r_N + r_N'(\alpha_N))^2 \times \cos\gamma} \times D_{lt}(\alpha_N) \times e^{[-2 \times (\delta \times r_N + \delta_1 \times r_1(\alpha_N))]},$$

где λ – длина волны в изделии; r_N – путь ультразвука в изделии; $r_1(\alpha_N)$ – путь в призме преобразователя; $r_N'(\alpha_N)$ – путь ультразвука от мнимой пьезопластины до точки ввода в изделие; $D_{lt}(\alpha_N)$ – коэффициент прохождения через границу призма-изделие; δ и δ_1 – затухание ультразвука в изделии и призме; γ – угол наклона призмы; S_a – площадь фазированной решётки; S_b – площадь дискового отражателя; α_N – угол ввода пучка в ОК.

Путь ультразвука от мнимой пъезопластины до точки ввода в изделие в зависимости от угла ввода определяется по формуле

$$r_N'(\alpha_N) = \frac{r_1 \times C_{l_{\Pi}} \times \cos\alpha_N}{C_t \times \cos\beta(\alpha_N)},$$

где C_{ln} – скорость продольной волны в призме; C_t – скорость поперечной волны в стали; $\beta(\alpha_N)$ – угол падения пучка на ОК.

Коэффициент прохождения через границу призма-изделие с учетом изменения угла ввода

$$D_{\rm lt}(\alpha_N) = \frac{4 \times Z_{\rm пад}(\alpha_N) \times Z_{\rm прел}(\alpha_N)}{\left(Z_{\rm пад}(\alpha_N) + Z_{\rm прел}(\alpha_N)\right)^2};$$

$$Z_{\rm пад}(\alpha_N) = \left(\frac{Z1}{\cos\beta(\alpha_N)}\right) \times \cos^2(2 \times \alpha_N);$$

$$Z_{\rm прел}(\alpha_N) = \left(\frac{Z2}{\cos\alpha_N}\right) \times \sin^2(2 \times \beta(\alpha_N));$$

где Z1 – акустический импеданс призмы; Z2 – акустический импеданс ОК.

В результате проведенных расчетов были получены АРД-диаграммы для плоскодонных отражателей в виде диска с различной площадью, пригодные для использования при настройке чувствительности фазированных решёток. Аналогично могут быть построены АРД-диаграммы для других типов дефектов и других объектов и условий контроля.

Для проверки эффективности использования результатов теоретического моделирования были проведены экспериментальные исследования амплитудно-угловых зависимостей эхо-сигналов при контроле фазированной решёткой в сравнении с традиционным эхо-импульсным методом на различных углах ввода. Объектами исследования служили искусственные отражатели в виде пазов, имитирующих плоскостные дефекты (рис. 1).



Рис. 1. Тест-образцы с искусственными отражателями в виде пазов

Контроль фазированной решёткой проводился дефектоскопом Phazor XS (рис. 2, а) с частотой преобразователя 4 МГц и диапазонами углов ввода: 35–45°, 45–55°, 60–70°. При контроле эхо-методом использовался прибор УД4-76 (рис. 2, б) с преобразователями частотой 2,5 МГц и углами ввода: 40, 55, 65°. В обоих случаях использовалась схема прозвучивания прямым и однократно отраженным лучом. Контроль проводился с усилением 5 дБ для прибора Phazor XS, для УД4-76 использовалось усиление 49,3 дБ. За 100 % амплитуды был выбран сигнал от паза высотой 3 мм при контроле с углом ввода 40° для традиционного эхо-метода и диапазоном углов 35–45° для фазированной решётки.



Рис. 2. Оборудование для контроля: а – ФАР-методом; б – эхо-методом

Результаты экспериментального исследования тест-образцов с вертикальным пазом отображены на графиках (рис. 3, 4, 5).



Рис. 3. Чувствительность при фиксации пазов с углом ввода 40° (эхометод) и диапазоном углов 35–45° (ФАР)



Рис. 4. Чувствительность фиксации пазов с углом ввода 50° (эхометод) и диапазоном углов 45–55° (ФАР)



Рис. 5. Чувствительность фиксации пазов с углом ввода 65° (эхометод) и диапазоном углов 60–70° (ФАР)

Из приведенных графиков видно, что на угле ввода 40° чувствительность при контроле ФАР и эхо-методами сопоставимы. На угле ввода 50° чувствительность фазированной решётки практически в 2 раза выше по сравнению с традиционным эхо-методом, а на угле 65° чувствительность у фазированной решётки почти 2 раза ниже по сравнению с эхо-методом.

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод о том, что технология ФАР обеспечивает высокую чувствительность контроля на диапазоне углов ввода 35–50° и с увеличением угла ввода чувствительность значительно падает, следовательно, при контроле ФАР- методом при выявлении дефекта на углах больших, чем 50°, необходимо использование специальных расчетных или аппаратных механизмов компенсации изменений амплитуд эхо-сигналов от равновеликих отражателей, что позволяет обеспечить равномерность чувствительности в пределах поперечного сечения сварного объекта контроля, прозвучиваемого способом секторного сканирования.

Для автоматизации процесса УЗК применяются механизмы сканирования с прикрепленной акустической системой. Наибольшее распространение в мире получили системы, использующие продольное сканирование, которое проще и надежнее, чем системы с возвратно-поступательным сканированием. Данные системы оснащаются одноэлементными пьезоэлектрическими датчиками, либо многоэлементными датчиками (монолитный корпус с несколькими пьезоэлементами, расположенными под разными углами). Однако в последнее время автоматизированные комплексы стали оснащать системами с ФАР, что значительно повысило информативность проводимого контроля.

На рис. 6 представлено разработанное универсальное переносное сканирующее устройство для контроля сварных соединений цистерн, резервуаров и прочих листовых и трубных конструкций. Сканер представляет собой автоматизированную систему, обеспечивающую позиционирование ультразвуковых преобразователей, в том числе и фазированных решеток относительно сварного соединения, прижим ПЭП, перемещение ПЭП вдоль шва.

При этом сканер обеспечивает:

 перемещение по заданной траектории с возможностью регулировки скорости перемещения от 5 до 140 мм/с;

- возможность корректировки положения относительно сварного шва;

– возможность работы как на продольных, так и на кольцевых сварных швах;

– настройку позиционирования преобразователей относительно сварного шва;

 – фиксацию координаты перемещения, с разрешающей способностью не менее 1 мм;

– возможность дистанционного управления;

– нанесение равномерного слоя контактной смазки на объект контроля.



Рис. 6. Универсальное переносное сканирующее устройство

Сканирующее устройство по сравнению с аналогами, представленными на рынке, имеет более компактную и удобную форму, возможность модульной замены блоков преобразователей. Конструктивное исполнение обеспечивает возможность контроля более широкого спектра промышленных объектов (сварные кольцевые и продольные швы труб, тавровые соединения, стыковые соединения пластин и другие объекты сложной формы). Кроме того, следует отметить наличие возможности дистанционного управления с современной следящей системой, а также более привлекательную стоимость по сравнению с подобными устройствами. Таким образом, разработанное устройство в совокупности с дефектоскопом обеспечивают более высокие метрологические характеристики средств контроля сварных соединений и, соответственно, возможность обнаружения разноориентированных дефектов и их идентификацию на новом качественном уровне.

Выводы

Усовершенствована теоретическая модель акустического тракта для ультразвукового контроля сварных швов с использованием линейной фазированной решетки и наклонной призмы на различных углах ввода, учитывающая влияние изменения:

– эффективного размера активной апертуры преобразователя;

 – расстояния от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча;

– затухания в призме (изменение длины хода луча по призме);

- коэффициента прозрачности по энергии на границе призма-объект;

– длины хода луча по контролируемому материалу.

Получены теоретические графики чувствительности для различных искусственных направленных и ненаправленных отражателей при различных углах ввода.

Экспериментально получены амплитудно-угловые зависимости эхосигналов от искусственных ненаправленных отражателей, которые позволили сформировать методику настройки прибора с фазированной решеткой при контроле сварных швов, учитывающую влияние всех основных дестабилизирующих факторов и обеспечивающую равномерность чувствительности в пределах диапазона углов качания пучка при секторном сканировании, что в целом способствует повышению достоверности и производительности контроля реальных объектов. Одновременное использование предложенных механизмов компенсации изменений амплитуд эхосигналов от равновеликих отражателей, рассмотренных в работе, позволяет обеспечить равномерность чувствительности в пределах поперечного сечения материала, прозвучиваемого способом секторного сканирования, даже в случаях, когда амплитуда эхо-сигнала существенно зависит от направления волны, взаимодействующей с отражателем.

УДК 620.19 ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ДЛЯ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. А. ШАРИН, А. В. ЧУПРИН, В. А. ЧУПРИН, Т. А. СОСНИЦКАЯ ООО «Научно-промышленная компания «ЛУЧ» Балашиха, Россия

UDC 620.19 APPLICATION OF PULSED CURRENT FOR DEMAGNETIZATION PARTS FROM MAGNETICALLY HARD MATERIALS P. A. SHARIN, A. V. CHUPRIN, V. A. CHUPRIN, T. A. SOSNITSKAYA

Аннотация

Доклад посвящен вопросу применения импульсного размагничивания для деталей из магнитотвердых материалов. В качестве объекта исследования использовались кольца подшипников. Исследовалась эффективность различных вариантов намагничивания и размагничивания колец. Установлено, что размагничивание колец предпочтительно делать не одиночными импульсами, а сериями по 3...5 импульсов одной полярности с уменьшением амплитуды от серии к серии.

Ключевые слова:

импульсный ток, намагничивание, размагничивание, кольцо подшипника.

Abstract

The report is devoted to the use of pulsed demagnetization for parts made of magnetically hard materials. As a research object, the bearing rings were used. The efficiency of various variants of magnetization and demagnetization of rings was investigated. It is established that demagnetization of rings is preferably done not by single pulses, but by 3 to 5 pulses in series of one polarity with decreasing amplitude from series to series.

Key words:

impulse current, magnetization, demagnetization, bearing ring.

Детали из магнитотвердых материалов часто контролируют способом остаточной намагниченности с применением импульсного тока, проходящего по детали или по намагничивающему устройству. После проведения контроля деталь требуется размагнитить, для чего, как правило, применяют то же импульсное устройство, которым намагничивали деталь. Процесс размагничивания согласно рекомендациям [1] должен длиться от 30 до 120 с, при этом не всегда удается размагнитить с первого раза, а иногда и многократное размагничивание не дает требуемого результата. Увеличение времени размагничивания приводит к снижению производительности, что следует учитывать при большом объеме контроля однотипных деталей. На качество размагничивания оказывает влияние множество различных факторов, в том числе параметры намагничивания, характеристики металла изделия, параметры размагничивающих импульсов.

1. Параметры намагничивания включают:

– вид намагничивающего поля или тока (постоянный, переменный, импульсный);

- частота тока и длительность импульса;

- максимальная амплитуда намагничивающего поля;

– ориентация намагничивающего поля.

2. Характеристики металла изделия: марка стали, твердость или режим термообработки, коэрцитивная сила, магнитная вязкость.

3. Параметры размагничивающих импульсов: амплитуда, длительность, форма и частота следования импульсов.

В рамках данной работы исследования проводились на кольцах подшипников, имеющих следующие параметры: марка стали – ШХ15; твердость HRC 42...62; коэрцитивная сила 38 А/см; диаметр 160 мм, высота 80 мм.

Целью работы является исследование влияния длительности намагничивающих и размагничивающих импульсов на качество размагничивания колец подшипников после проведения магнитопорошкового контроля.

Намагничивание осуществлялось устройством УНИ-2000/4000 [2], обеспечивающим регулировку длительности импульсов от 1,5 до 2,5 мс (аналог устройства, входящего в установку МДС-09 [3], обеспечивающей регулировку длительности импульса до 10 мс). Измерение напряженности поля и остаточной намагниченности проводилось миллитесламетром ТП2-2у.

Намагничивание кольца осуществлялось таким образом, чтобы получить на его поверхности максимальную намагниченность. Это достигалось намоткой трех витков кабеля с одной стороны кольца (рис. 1), при этом максимальная намагниченность наблюдалась на торцевой поверхности кольца в пределах 100 мм от крайнего витка.



Рис. 1. Положение витков кабеля на кольце подшипника

На рис. 1 стрелками показаны точки измерения остаточной намагниченности. Согласно [4] размагничивание импульсным полем получается качественным, если деталь была намагничена импульсным полем. При этом не учитывается влияние длительности импульса. Практически, в ряде случаев целесообразно намагничивать деталь короткими импульсами, а размагничивать более длинными. Например, для намагничивания кольца для контроля достаточно длительности импульса $\tau=1,5$ мс, а для качественного размагничивания предпочтительно длительность импульса увеличить. Кроме того, из-за магнитной вязкости [5] материала кольца рекомендуется намагничивать не менее, чем тремя импульсами.

Для уточнения необходимого числа импульсов намагничивания и перемагничивания кольцо подшипника было полностью размагничено. Размагничивание кольца проводилось в несколько этапов с вращением кольца и сменой ориентации поля на 90° таким образом, чтобы остаточная намагниченность не превышала 5 А/см. Затем кольцо намагнитили 10 импульсами условной полярности N1 с измерением остаточной намагниченности после каждого импульса. После этого кольцо дважды перемагнитили десятью импульсами полярности S и N2 длительностью $\tau=1,5$ мс. Потом кольцо опять размагнитили и все повторили с импульсами длительностью $\tau=2,5$ мс. Характер изменения намагниченности кольца от импульса к импульсу показан на рис.2.

Из графиков (рис. 2) видно, что при первом намагничивании из размагниченного состояния (графики N1) кольцо в обоих случаях (рис. 2, а и 2, б) намагничивается практически до максимального значения после прохождения первого импульса тока. Тогда как, при перемагничивании кольца полярностью S, N2 и длительности импульса τ =1,5 мс, достаточная намагниченность достигается после пятого импульса (рис. 2, а), а при τ =2,5 мс – увеличение намагниченности прекращается после третьего импульса (рис.2, б), что объясняется магнитной вязкостью металла [4, 5].



Рис. 2. Характер изменения намагниченности кольца в зависимости от числа размагничивающих импульсов длительностью τ = 1,5 мс (а) и τ =2,5 мс (б)

Из этого можно сделать вывод, что намагничивать кольца нужно не менее, чем пятью импульсами тока, если их длительность $\tau=1,5$ мс, и не менее, чем тремя – при $\tau=2,5$ мс, так как кольца, поступающие на контроль, имеют произвольную намагниченность.

Для определения режима размагничивания, кольцо размагничивали при двух длительностях и двумя способами – одиночными импульсами и сериями по 5 импульсов (рис. 3). Намагничивание кольца осуществлялось во всех случаях импульсом тока 3000 A (условно полярности N). Размагничивание начиналось с импульса противоположной полярности (S) немного большей амплитуды, а затем амплитуда снижалась с каждым импульсом с шагом 250 A. На гистограммах первый импульс соответствует намагничиванию.

Из сравнения гистограмм на рис. 3, а и 3, б видно, что при намагничивании одиночными короткими импульсами кольцо намагничивается только до 50 А/см (рис. 3, а), а при снижении тока до 2000 А и менее наблюдается явный перекос в сторону полярности намагничивания. Это объясняется магнитной вязкостью металла кольца – за 1,5 мс металл не успевает намагнититься до состояния близкого к насыщению. Этим же объясняется и перекос, т.к. домены легче разворачиваются в сторону первого намагничивания.

При размагничивании сериями импульсов (рис. 3, б) уровень намагничивания разной полярности несколько выравнивается, но при малых значениях тока все-таки происходит перекос, и требуемое размагничивание отсутствует. Было сделано предположение, что размагничивание не происходит из-за большого шага уменьшения тока в области малых токов. Поскольку вручную уменьшить шаг невозможно, то кольцо дополнительно размагничивали автоматически, меняя время размагничивания: 10, 30 и 60 с. Во всех случаях остаточная намагниченность кольца была более 7 А/см.



Рис. 3. Размагничивание колец импульсами длительностью $\tau=1,5$ мс (a, б) и $\tau=2,5$ мс (b, г) одиночными импульсами (a, b) и сериями по 5 импульсов (б, г)

При размагничивании кольца одиночными импульсами и сериями импульсов длительностью 2,5 мс происходит выравнивание токов в первом случае после 1750 А, а во втором – после 2250 А. При этом в обоих случаях кольцо было размагничено до допустимых пределов.

Выводы

1. Намагничивание колец при длительности импульса $\tau = 1,5$ мс нужно проводить не менее, чем пятью импульсами.

2. При длительности импульса $\tau = 2,5$ мс для надежного намагничивания кольца нужно пропустить не менее 3 импульсов, учитывая то, что на практике не всегда известно, как намагничено кольцо, поступившее на контроль.

3. Размагничивание колец предпочтительно делать не одиночными импульсами, а сериями по 3...5 импульсов одной полярности с уменьшением амплитуды от серии к серии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелихов, Г. С. Магнитопорошковый контроль с применением переносных дефектоскопов / Г. С. Шелихов, Ю. А. Глазков, М. В. Сапунов. – М. : Изд. дом «Спектр», 2010. – 192 с.

2. Устройство для магнитопорошкового контроля УНИ 2000/4000 / В. Ю. Константинов [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 1 (51) – С. 76–78.

3. Магнитопорошковый контроль деталей сложной формы в процессе эксплуатации / А. В. Чуприн [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – T.19 – № 2. – С. 73–75.

4. Шелихов, Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия // Под ред. акад. В. В. Клюева. – М. : Издательский дом «Спектр», 2010. – 336 с.

5. **Мишин, Д. Д.** Магнитные материалы : учеб. пособие для вузов. / Д. Д. Мишин. – М. : Высш. шк., 1991. – 384 с.

E-mail: <u>petrasharin@mail.ru</u> <u>avchuprin@mail.ru</u> <u>vachuprin@mail.ru</u> <u>sosnatas@yandex.ru</u>

УДК 621.317.4; 621.317 ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

И. И. БРАНОВИЦКИЙ, И. Т. СКУРТУ, А. С. ЕРОШЕНКО

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 621.317.4; 621.317 PRECISION MEASUREMENTS OF MAGNETIC PROPERTIES OF ELECTRICAL STEEL I. I. BRANOVITSKY, I. T. SKURTU, A. S. YEROSHENKO

Аннотация

В статье описана реализация индукционного метода измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов при частоте 50 Гц, включая разработанный высокоточный алгоритм синусоизации магнитного потока в ферромагнетике. Дано описание созданной на этой основе эталонной установки и государственных стандартных образцов для аттестации, поверки и калибровки рабочих средств контроля магнитных свойств электротехнических сталей в соответствии с требованиями нормативной документации.

Ключевые слова:

эталонная установка, алгоритм синусоизации, магнитные характеристики.

Abstract

The paper is about implementation of inductive method for magnetic measurements of soft-magnetic materials characteristics at 50 Hz. High precision algorithm of sinusoidal magnetic flux realization is considered. Anetalon with thereference materialsfor calibration and verification of the ordinary instruments for electrical steels magnetic measurements are described.

Key words:

ethalon, reference installation, sinusoising algorithm, magnetic characteristics.

В связи с тем, что магнитные характеристики магнитопроводов, изготавливаемых из магнитомягких материалов типа электротехническая сталь (ЭТС) являются одним из основных факторов, определяющих технический уровень изделий электромашиностроения, в развитых странах реализована четкая система аттестации ЭТС по магнитным характеристикам (удельные магнитные потери и магнитная индукция) на стадии выходного (производители) и входного (потребители стали) контроля. В 1998 г. с целью восстановления единых правил аттестации ЭТС Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации стран СНГ, в том чиссистема межгосударственных Беларуси, принята стандартов ле (ГОСТ 12119.(0-8)-98) [1-3], устанавливающих порядок определения магнитных и электрических свойств ЭТС. Указанные стандарты определяют

основные требования к процедурам измерения магнитных характеристик ЭТС рабочими средствами.

В Институте прикладной физики НАН Беларуси созданы первые в Республике Беларусь и одни из первых в странах СНГ современные рабочие средства измерения удельных магнитных потерь и магнитной индукции в ЭТС – магнитоизмерительные установки УМ-ИМПИ и УМЦ, предназначенные для контроля магнитных свойств ЭТС. Работа установок методически и технически соответствует установленным международным процедурам и указанным выше межгосударственным стандартам, они сертифицированы в Республике Беларусь, а УМ-ИМПИ и в Российской Федерации.

Для разработки эталонной базы, которая позволила бы осуществлять в Республике Беларусь поверку, калибровку и аттестацию рабочих средств измерения в ИПФ НАН Беларуси была проведена НИОКР в рамках подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы» и создана в 2015 г. эталонная установка (ЭУ) (см. рис. 1), а также стандартные образцы для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц удельных магнитных потерь и магнитной индукции в электротехнической стали. К работе по заданию были привлечены также специалисты БелГИМ. В результате были изготовлены, исследованы и сертифицированы 4 государственных стандартных образца (ГСО) для хранения и передачи рабочим средствам размера единиц удельных магнитных потерь и магнитной индукции в электротехнической стали. ГСО созданы в виде пакетов пластин 280х30 мм (эпштейновская проба) из анизотропной и изотропной ЭТС, в виде отдельного листа 250х500 мм и кольца – оба из анизотропной ЭТС.

В основе работы созданной ЭУ лежит индукционный метод измерений, который базируется на аналого-цифровом преобразовании мгновенных значений сигналов, пропорциональных напряженности магнитного поля на поверхности стандартного образца и производной по времени средней по сечению образца магнитной индукции, в цифровые коды с последующим вычислением магнитных характеристик образца.

Разработанная ЭУ измеряет динамические магнитные характеристики ГСО из магнитомягких материалов типа электротехническая сталь в синусоидальном режиме перемагничивания на частоте 50 Гц. Персональный компьютер, входящий в состав магнитоизмерительной установки, работает по измерительной программе, разработанной для данной установки на языке высокого уровня и управляет программируемым генератором, входящим в состав блока намагничивания и состоящим из цифроаналогового преобразователя и усилителя мощности, задавая синусоидальный режим перемагничивания испытуемого образца, обеспечивает измерение электрических сигналов, пропорциональных напряженности магнитного поля и скорости изменения магнитной индукции в образце, рассчитывает необходимые магнитные характеристики. Использование компьютера позволяет автоматизировать процесс измерения и расширить функциональные возможности установки в части измерения дополнительных магнитных характеристик, таких как остаточная индукция, коэрцитивная сила, магнитная проницаемость и др. ЭУ выполнена в виде комплекса аппаратнопрограммных подсистем, реализующих разработанный функциональный порядок операций, и обеспечивающих высокоточные измерения указанных выше магнитных характеристик ЭТС на ГСО различного типа.



Рис. 1. Общий вид ЭУ для измерения магнитных свойств электротехнической стали

Были ппроведены исследования по оптимизации режимов намагничивания ГСО, а также измерительных процедур, в результате которых разработаны алгоритмы: синусоизации формы изменения магнитной индукции в материале ГСО за цикл перемагничивания; выхода на точки максимальных значений магнитной индукции и напряженности магнитного поля; автоматической калибровки ЭУ и др. При проведении магнитных измерений, в особенности эталонных, одной из наиболее важных задач является поддержание синусоидального режима перемагничивания исследуемого образца. Причиной появления искажений намагничивающего сигнала является активно-реактивный характер нагрузки намагничивающей системы. Вклад искажений для образцов электротехнической стали становится существенным на достаточно больших напряженностях магнитного поля (1000–2500 А/м), где они могут негативным образом влиять на результаты измерений. Количественной мерой оценки искажений может служить коэффициент нелинейных искажений (КНИ).

В [4] показана возможность поддержания магнитного потока в образце в итерационном режиме, однако, иногда изменение формы намагничивающего сигнала во время задания режима перемагничивания может быть затруднительно в силу сложности переходных процессов обновления сигнала при использовании цифровых генераторов. В таком случае можно привести форму потока к синусоидальной, используя алгоритм, основанный на наличии априорной информации.

Информацию об искажениях магнитного потока при различных значениях магнитного поля можно получить путем записи сигналов напряжения вторичной обмотки первичного преобразователя и напряжения на токосъемном шунте при размагничивании стандартного образца. Далее с помощью интерполяции двумерного массива можно получить искаженный сигнал для требуемого значения индукции или напряженности магнитного поля.

Сигнал предыскажений получается путем вычитания искаженного сигнала из синуса той же амплитуды. Также следует учитывать дополнительный фазовый сдвиг, вносимый всей системой в целом, который сложно оценить аналитически.

Перед вычислением сигнала предыскажений необходимо привести амплитуду искаженного сигнала к единичной и произвести его сдвиг. Разность полученного сигнала и синуса единичной амплитуды дадут искомый сигнал предыскажений. Далее он складывается с синусоидальным сигналом и записывается в буфер ЦАП. Сигнал предыскажений может быть представлен следующим образом:

$$U(i) = U(i) - \frac{U_B(i-n)}{\max(U_B)},$$
(1)

где U_c – сигнал синуса единичной амплитуды; U_B – искаженный сигнал измерительной обмотки первичного преобразователя; $\max(U_B)$ – амплитуда искаженного сигнала измерительной обмотки первичного преобразователя; $i = 0 \dots N - 1$ – текущий отсчет; N – количество отсчетов; n – сдвиг искаженного сигнала.

Оптимальный сдвиг искаженного сигнала зависит от разницы фаз между током и напряжением, который может быть вычислен как:

$$\varphi = \operatorname{arctg}((2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)/R), \qquad (2)$$

где f – частота намагничивающего сигнала; L – оценка индуктивности намагничивающей обмотки первичного преобразователя; R – суммарное активное сопротивление шунтирующего резистора и намагничивающей обмотки.

Эта зависимость может быть аппроксимирована функцией

$$n(\varphi) = \alpha_1 \cdot \exp(\beta \cdot \varphi) + \alpha_2, \tag{3}$$

где α_1 , β , α_2 – коэффициенты.

Таким образом, намагничивающий сигнал имеет форму смеси синусоидального сигнала и сигнала предыскажений, что позволяет получить синусоидальный режим перемагничивания исследуемого образца при проведении измерения.

Используя вышеприведенную методику, удалось добиться снижения КНИ до величин менее 0,1 % на индукции 1,9 Тл и выше.

Результаты испытаний ЭУ при аттестации свидетельствуют о высокой стабильности ее показаний и точности измерения, удовлетворяющих требованиям ТЗ на создание эталонной установки.

Основные характеристики эталонной установки: диапазон воспроизведения единицы удельных магнитных потерь – 0,3–10,0 Вт/кг; диапазон воспроизведения единицы магнитной индукции – 0,1–1,95 Тл; доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения единицы удельных магнитных потерь при доверительной вероятности P = 0,99 и числе измерений n = 10 не более: при измерении на ГСО в виде пакета пластин и в виде кольца – 0,8 %; при измерении на ГСО в виде листа – 1 %; доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения единицы магнитной индукции при доверительной вероятности P = 0.99 и числе измерений n = 10 не более: при измерении на ГСО в виде листа – 1 %; доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения единицы магнитной индукции при доверительной вероятности P = 0.99 и числе измерений n = 10 не более: при измерении на ГСО в виде пакета пластин и в виде кольца – 0,5%; при измерении на ГСО в виде пакета пластин и в виде кольца – 0,5%; при измерении на ГСО в виде листа – 1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12119.0-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Общие требования. – Минск, 1999.

2. ГОСТ 12119.4-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля. – Минск, 1999.

3. ГОСТ 12119.5-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения амплитуд магнитной индукции и напряженности магнитного поля. – Минск, 1999.

4. Пат. 10958 Республик Беларусь, МПК G 01R 33/12. Способ формирования синусоидальной индукции в ферромагнитном образце / И. И. Брановицкий, М. Н. Путырский; заявитель и патентообладатель Институт прикладной физики НАН Беларуси. – № 20060894; заявл. 12.09.06; опубл. 30.04.08. – 3 с.

E-mail: <u>branovitsky@iaph.bas-net.by</u>

УДК 620.179 ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, Д. А. ВИНТОВ, *П. А. ПОДУГОЛЬНИКОВ, *А. Н. ПРУДНИКОВ, **В. Н. РЯБЦЕВ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» *ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» ** Белорусский национальный технический университет Минск, Могилев, Беларусь

Аннотация

Представлены результаты работы по исследованию метода эффекта Баркгаузена при двухосном напряженно-деформированном состоянии материала. Математическое моделирование, независимые измерения интенсивности магнитного шума на крестообразном образце оптимизированной формы с использованием двухосного нагружающего оборудования оригинального типа подтверждают инвариантность метода эффекта Баркгаузена относительно любых изменений шаровой компоненты тензора деформаций (напряжений).

Ключевые слова:

двухосная нагрузка, внутреннее напряжение, деформация, шум Баркгаузена, математическая модель, 3D-диаграмма.

Abstract

The results of investigation on the magnetic Barkhausen effect method in the biaxial stress state of the material are represented. Mathematical modeling, independent measurement of Barkhausen noise intensity on the cross-shaped specimen of the optimized form and using the original type biaxial loading equipment confirm the regularity of the invariance of the magnetic Barkhausen effect method relatively to any changes of spherical (isotropic) strain/stress tensor.

Key words:

biaxial loading, internal stress, strain, Barkhausen noise, mathematical model, 3D diagram.

Разработка высокоэффективных и более надежных методов определения механических напряжений в ферромагнитных объектах является одной из актуальных задач как неразрушающего контроля, так и технической диагностики. Магнитные методы оценки напряженно-деформированного состояния объектов, в частности, метод эффекта Баркгаузена, имеют перспективу измерения двухосных напряжений, присущих для большинства металлических конструкций.

В рамках двухосного напряженно-деформированного состояния (НДС) даже одноосная нагрузка материала приводит к плосконапряженному состоянию в любой части образца. Важно опреде-

лить ту часть деформации, которая вызывает изменения физических параметров в исследуемом материале.

Из закона Акулова для магнитной анизотропии, где кубические кристаллы описываются изменением свободной энергии под внешним воздействием упругих напряжений, следует, что причиной перестройки доменной структуры является возникновение анизотропии в материале, что влияет на уровень интенсивности магнитного шума (МШ) как на показатель состояния доменной структуры.

Этот вывод был проверен моделированием методом конечных элементов (МКЭ).



Рис. 1. МКЭ модель основного распределения напряжения/деформации внутри трех одинаковых фрагментов крестообразного образца после приложения напряжений в горизонтальном и вертикальном направлениях в соотношении: а – 2,5:2,5; б – 5:5; в – 2,5:5

Рис. 1, а и 1, б соответствуют симметричному нагружению (отношение главных компонент напряжений 1:1) при двукратной разнице в значении приложенной нагрузки: 2,5 против 5 соответственно. В то же время приложение ассиметричной нагрузки (1:2) во взаимно перпендикулярных направлениях полностью меняет картину (рис. 1, в.) из-за появления сдвиговой компоненты напряжений. Видно, что симметричная нагрузка (пренебрегая Z-координатой, близкая к гидростатическому состоянию) не влияет на картину деформации/напряжений в модели МКЭ.

При плоском напряженном состоянии материала измерения интенсивности магнитного шума производят в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в предположении что в значения магнитного шума, измеренного датчиком, одновременно вносят вклад оба главных напряжения, действующих при плоском напряженном состоянии (принцип суперпозиции).

Функциональная зависимость выходных параметров от входных определяется в этом случае выражением:

$$\begin{cases} V_1(\sigma_1, \sigma_2) = k(\sigma_1) + h(\sigma_2) \\ V_2(\sigma_1, \sigma_2) = k(\sigma_2) + h(\sigma_1) \end{cases},$$
(1)

где V_1, V_2 - МШ при расположении датчика вдоль напряжений σ_1, σ_2 со-

ответственно; $k(\sigma)$, $h(\sigma) - функции$ преобразования датчика величины напряжения σ , направленного вдоль (перпендикулярно) оси датчика.

Решение системы уравнений с использованием экспериментальных широком диапазоне нагрузок, позволяет получить данных В аналитическую зависимость результатов измерительного процесса при плосконапряженном состоянии. С этой целью проведен эксперимент на цилидрических образцах, натурных находящихся под различным внутренним избыточным давлением.

На рис. 2, а представлены экспериментальные и полученные расчетные зависимости модели (1) для цилиндрического образца, на рис. 2, б – $k(\sigma)$, $h(\sigma)$ – функции преобразования напряжений в магнитный шум.



Рис. 2. Графики: а – градуировочных зависимостей, полученных при эксперименте и моделировании; б – функций преобразования датчика

Функции преобразования напряжений в магнитный шум $k(\sigma)$, $h(\sigma)$ в зоне упругой деформации равны между собой с отличием в знаке. Таким образом, систему уравнений (1) можно записать в виде:

$$\begin{cases} V_1(\sigma_1, \sigma_2) = f(\sigma_1 - \sigma_2) \\ V_2(\sigma_1, \sigma_2) = f(\sigma_2 - \sigma_1) \end{cases}$$
(2)

Как видно, интенсивность магнитного шума зависит от разности напряжений, а не от их абсолютного значения [1].

Для проверки адекватности предложенной математической модели измерения МШ при плосконапряженном состоянии проведено сравнение результатов эксперимента, основанного на испытании крестообразного образца и численного моделирования, полученного подставлением в систему уравнений (1) значений σ_1 и σ_2 от 0 до 200 МПа и нахождением через функции преобразования $k(\sigma)$ и $h(\sigma)$, V_1 и V_2 . Графическое представление в виде 3D-диаграммы изменения магнитного шума (ось аппликат) в зависимости от величин главных значений деформаций по обеим осям X и Y приведены на рис. 3.



Рис. 3. 3D-диаграмма интенсивности МШ (ось Z) в зависимости от значений напряжений σ_x (X-ось) и σ_y (Y-ось): а – эксперимент; б – расчет

Сравнение приведенных графиков приводит к выводу о достаточной близости друг к другу результатов измерений МШ на крестообразном образце и расчетных значений МШ, а также об адекватности разработанной математической модели и возможности ее применения для моделирования процесса измерения плосконапряженного состоянии. К тому же из результатов видно, что увеличение напряжений может вызывать как рост величины МШ, так и его уменьшение, что обуславливает необходимость взаимоучета значений главных напряжений при решении обратной задачи определения напряжений методом, основанным на эффекте Баркгаузена [2].

Анализируя полученные результаты и, в частности, 3D-диаграммы можно сделать вывод о том, что интенсивность магнитного шума зависит только от девиаторной (сдвиговой) компоненты тензора напряжений, а в условиях гидростатического сжатия или растяжения зависит только от микроструктуры материала, а не от значений симметричных деформаций/

напряжений. Присутствие остаточных напряжений в материале вызывает только смещение градуировочной характеристики магнитного шума вдоль соответствующей оси на величину остаточных напряжений, что позволяет достаточно просто их определить и учитывать в процессе измерения. Этот вывод подтверждается независимыми измерениями интенсивности МШ на крестообразном образце оптимальной формы и цилиндрических образцах, таких как трубы и баллон, под давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sablik, M. J.** Modeling the Effects of Biaxial Stress on Magnetic Properties of Steels with Application to Biaxial Stress NDE / M. J. Sablik // Nondestructive Testing and Evaluation. – 1995. – Vol. 12, No. 2. – P. 87–102.

2. Advance in Stress Measurement via Barkhausen Noise / V. Vengrinovich // 19th World Conference on Non-Destructive Testing, WCNDT 2016, 13-17 June 2016; Proceedings. – Munich, Germany.

УДК 621.891

МЕТОДЫ КАРТИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. Л. ЖАРИН, К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, А.В. САМАРИНА, А. И. СВИСТУН, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, К.Л. ТЯВЛОВСКИЙ

Белорусский национальный технический университет Минск, Беларусь

UDC 621.891

METHODS OF DEVICE LAYERS MAPPING FOR SEMICONDUCTOR WAFERS

R. I. VOROBEY, O. K. GUSEV, A. L. ZHARIN, K. Y. PANTSIALEYEU, A. Y. SAMARINA, A. SVISTUN, A. K. TYAVLOVSKY, K. L. TYAVLOVSKY

Аннотация

Выполнен сравнительный анализ методов картирования приборных слоев полупроводниковых пластин. Показана перспективность методов на основе регистрации изменений потенциала поверхности зондовым электрометрическим преобразователем в режиме статической либо динамической фотоЭДС, отличающихся полностью неразрушающим характером измерений и позволяющих получить ряд новых количественных и качественных характеристик приборных слоев.

Ключевые слова:

картирование, полупроводниковая пластина, приборные структуры, зондовая электрометрия, поверхностная фотоЭДС.

Abstract

Methods of device layers mapping for semiconductor wafers are discussed and compared. Probe electrometry methods based on surface potential registration in a static or dynamic SPV mode allow a completely non-destruction testing that gives a number of new quantitative and qualitative parameters of the device layers.

Key words:

mapping, semiconductor wafer, device layers, probe electrometry, surface photo-voltage.

Первые разработки в области картирования приборных слоев полупроводниковых пластин относятся к 1970-м гг. [1, 2]. В качестве контролируемого параметра при этом выступала однородность распределения легирующей примеси после ионной имплантации. Сканирование выполнялось в ручном режиме с представлением результатов в виде текстовой таблицы. Далее на основании полученной таблицы строились двумерные либо трехмерные карты. Контроль однородности распределения легирующей примеси осуществлялся на основе измерений удельного поверхностного сопротивления в ряде дискретных точек поверхности образца. В качестве дополнительного наглядного средства контроля однородности распределения, при использовании данных методов, может использоваться построение профиля удельного поверхностного сопротивления либо иного параметра вдоль определенной линии или нескольких параллельных линий [3].

В настоящее время в число применяемых при картировании приборных слоев полупроводниковых пластин методик входят также измерение поверхностного сопротивления четырехзондовым методом, модулированная фоторефлектометрия, оптическая денситометрия [4].

Четырехзондовый метод измерения поверхностного сопротивления имеет ряд ограничений:

1) метод является контактным, при этом результат измерений зависит от качества контакта зондов с поверхностью полупроводника;

2) при низких уровнях легирования проводника, дающих малые значения поверхностной проводимости, метод характеризуется большими погрешностями;

3) ток в цепи измерительного преобразователя сопоставим с поверхностными токами утечки.

Наличие непосредственного механического контакта зонда с поверхностью полупроводниковой пластины выводит данный метод из категории неразрушающих.

Метод модулированной фоторефлектометрии, называемый также методом тепловой волны, может быть реализован без непосредственного контакта измерительного преобразователя с поверхностью полупроводниковой пластины [5, 6]. Схема реализации метода показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема картирования приборных слоев полупроводниковой пластины методом модулированной фоторефлектометрии Излучение накачивающего Ar⁺ лазера модулируется с частотой от 100 кГц до 10 МГц, что приводит к локальному нагреву поверхности полупроводниковой пластины в точке воздействия и распространению по ее поверхности волн нагрева, частота которых соответствует частоте модуляции; в частности, при частоте модуляции 1 МГц длина волны (расстояние между гребнями волн нагрева) составит от 2 до 3 мкм [5]. Скорость распространения волны нагрева зависит от наличия дефектов в исследуемой области, что приводит к искажению ее фронта при прохождении волны через дефект. Коэффициенты отражения поверхности полупроводниковой пластины в зонах гребня и впадины волны нагрева будут различными как вследствие термического расширения материала (термоупругий эффект), так и вследствие существующих для полупроводника термооптических эффектов [7]. Для регистрации данных различий и, соответственно, определения формы фронта волны нагрева для последующего вычисления скорости ее распространения используется второй (измерительный) лазер.

Преимуществами метода модулированной фоторефлектометрии является возможность выполнения измерений при нормальных внешних условиях (без использования вакуумной камеры), независимость результатов исследования от наличия и толщины диэлектрического слоя на поверхности полупроводниковой пластины, возможность одновременного определения типа дефектов на основании измерения скорости распространения волны нагрева, зависящей от межатомного расстояния, и их концентрации на основании отношения коэффициентов отражения в максимумах и минимумах волны нагрева, полностью неразрушающий характер исследования. В то же время, вследствие того, что распространение волны нагрева происходит во всем объеме полупроводника, а не только на поверхности пластины, метод модулированной фоторефлектометрии не позволяет уверенно различать дефекты поверхности и объема полупроводника, и при этом характеризуется сложностью технической реализации.

Принципиальная возможность картирования приборных структур в тонких поверхностных слоях обеспечивается при условии резкого контраста в удельной электрической проводимости подложки и контролируемого слоя, т.е. при наличии мелких *p-n* переходов [3]. В этом случае коэффициенты отражения подложки и поверхностного слоя также будут различными, вследствие их разной удельной электрической проводимости, однако эта разница слишком мала для выполнения измерений традиционными методами. Резкого повышения удельной электрической проводимости и, соответственно, коэффициента отражения оптического излучения можно добиться локальным воздействием на поверхность оптическим излучением высокой интенсивности (в частности, лазерным) с длиной волны, соответствующей ширине запрещенной зоны кремния, что приводит к генерации в зоне воздействия избыточных носителей заряда, В частности, для воздействия может использоваться лазер с длиной волны 830 нм, при этом более длинноволновой лазер с $\lambda = 980$ нм используется для измерения коэффициента отражения. Распределение избыточных носителей заряда в подложке является равномерным (плоским), с резким спадом на границе профиля легирования (на *p-n* переходе). Изменение коэффициента отражения Δn связано с величиной избыточной концентрации носителей заряда ΔN известным соотношением [8].

Схема технической реализации данного метода соответствует рис. 1. Различие с методом тепловой волны состоит в режиме воздействия на поверхность полупроводниковой пластины, при котором модулированное оптическое (лазерное) излучение используется для инжекции избыточных носителей заряда в точке выполнения измерений, а не для генерации волн нагрева.

Большой интерес в настоящее время проявляется к методам картирования приборных слоев полупроводниковых пластин на основе зондовой электрометрии, исследования в области которых в течение длительного времени проводятся в НИЛ полупроводниковой техники Белорусского национального технического университета (рис. 2). При использовании методов зондовой электрометрии избыточная концентрация носителей заряда может быть определена путем бесконтактной регистрации изменения электрического потенциала поверхности полупроводниковой пластины при воздействии на нее модулированным оптическим излучением, что является значительно более чувствительным и, соответственно, более точным методом, чем косвенные измерения путем регистрации изменений коэффициента отражения. Помимо повышения точности, данный метод характеризуется более простой технической реализацией. Картирование приборных слоев полупроводниковых пластин при использовании данного метода может выполняться в одном из двух режимах:

а) режим статической фотоЭДС. В этом режиме поверхность полупроводниковой пластины локально освещается монохроматическим оптическим излучением с изменяющейся длиной волны. Поскольку глубина проникновения оптического излучения в кремний является функцией от его длины волны, регистрация изменений величины поверхностной фото-ЭДС либо изменений интенсивности оптического излучения при поддержании постоянного значения поверхностной фотоЭДС на разных длинах волн позволяет определить длину диффузии генерируемых при таком воздействии избыточных носителей заряда в приповерхностных слоях полупроводника;

б) режим динамической фотоЭДС. В этом режиме освещение поверхности полупроводника осуществляется короткими импульсами высокой интенсивности. Анализ зависимости поверхностной фотоЭДС от длительности импульса и плотности мощности оптического излучения в импульсе позволяет определить величину поверхностного изгиба энергетических зон, скорость рекомбинации и время жизни неравновесных носителей заряда. При наложении на полупроводник электростатического поля известной напряженности, например, путем осаждения на окисленную поверхность полупроводника электрического заряда в коронном разряде, данный режим дополнительно обеспечивает возможность определения и картирования энергетического профиля поверхностных состояний D_{it} [9].



Рис. 2. Установка для неразрушающего контроля полупроводниковых пластин методом зондовой электрометрии, разработанная в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ

Предлагаемая структурная схема установки, реализующей оба указанных режима измерений, приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема разрабатываемой установки картирования приборных слоев полупроводниковых пластин на основе регистрации изменений потенциала поверхности зондовым электрометрическим преобразователем в режиме статической либо динамической фотоЭДС

Существенными преимуществами разрабатываемых средств измерений на основе регистрации изменений потенциала поверхности зондовым электрометрическим преобразователем в режиме статической либо динамической фотоЭДС являются полностью неразрушающий характер измерений, отсутствие механического контакта измерительного преобразователя с поверхностью полупроводниковой пластины, отсутствие необходимости какой-либо подготовки образца к измерениям, выполнение измерений при нормальных условиях окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Crossley, P. A.** Use of Test Structures and Results of Electrical Test for Silicon-On-Sapphire Integrated Circuit Processes / P. A. Crossley, W. E. Ham // J. Electron. Mat. 2, Aug. 1973. – P. 465–483.

2. **Perloff, D. S.** Four-Point Sheet Resistance Measurements of Semiconductor Doping Uniformity / D. S. Perloff, F. E. Wahl, J. Conragan // J. Electrochem. Soc. 124, April 1977. – P. 582–590.

3. Schroder, D. K. Semiconductor material and device characterization / D. K. Schroder. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 790 p.

4. **Yarling, C. B.** Uniformity Mapping in Ion Implantation / C. B. Yarling, W. H. Johnson, W. A. Keenan, L. A. Larson // Solid State Technol. 34/35, 57–62, Dec. 1991; 29–32, March 1992.

5. Rosencwaig, A. Thermal-wave Imaging / A. Rosencwaig // Science 218, Oct. 1982 – P. 223–228.

6. Amer, N. M. A Novel Method for the Study of Optical Properties of Surfaces / N. M. Amer, M. A. Olmstead // Surf. Sci. 132, Sept. 1983 – P. 68–72.

7. Rosencwaig, A. Detection of Thermal Waves Through Optical Reflectance / A. Rosencwaig, J. Opsal, W.L. Smith, D.L. Willenborg // Appl. Phys. Lett. 46, June 1985 – P. 1013–1015.

8. **Borden, P.** Junction Depth Measurement Using Carrier Illumination / P. Borden // Characterization and Metrology For ULSI Technology 2000 (D. G. Seiler, A. C. Diebold, T. J. Shaffner, R. McDonald, W. M. Bullis, P. J. Smith, and E. M. Sekula, eds.) – Am. Inst. Phys. 550, 2001 – P. 175–180.

9. Воробей, Р. И. Методика определения плотности заряда на ловушках в структуре кремний-диэлектрик с использованием коронного разряда и регистрации поверхностного потенциала / Р. И. Воробей [и др.] // Приборостроение–2012: материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2012 г. – Минск : БНТУ. – 2012. – С. 34–36.

E-mail: nil_pt@bntu.by

УДК 620.179.14 ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА ОТДЕЛЬНЫХ ЗОН СВАРНОЙ ТРУБЫ С РАЗЛИЧНЫМ ИСХОДНЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Э. С. ГОРКУНОВ, А. М. ПОВОЛОЦКАЯ, С. М. ЗАДВОРКИН

ФГБУН «Институт машиноведения Уральского отделения РАН» Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

PECULIARITIES OF MAGNETIC BEHAVIOR IN THE ELASTIC DE-FORMATION OF METAL IN INDIVIDUAL ZONES OF WELDED PIPE WITH DIFFERENT INITIAL STRESS-STRAIN STATES *E. S. GORKUNOV, A. M. POVOLOTSKAYA, S. M. ZADVORKIN*

Аннотация

Изучено влияние величины предварительной пластической деформации, моделирующей исходное напряженно-деформированное состояние (НДС) изделия, на поведение магнитных характеристик металла различных зон сварной трубы при последующем упругом растяжении и сжатии. Измерения магнитных характеристик образцов проводили как в условиях замкнутой магнитной цепи, так и с применением накладных преобразователей вдоль и поперек направления приложения нагрузки.

Предыстория в виде пластической деформации одноосным растяжением сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материалов различных участков сварной трубы при последующем упругом деформировании как следствие вносимых пластической деформацией остаточных напряжений различного уровня, что свидетельствует о необходимости учета исходного НДС металлоконструкций при разработке магнитных методов определения параметров их НДС в процессе эксплуатации.

Ключевые слова:

предварительная пластическая деформация, упругое одноосное растяжение/сжатие, коэрцитивная сила.

Abstract

The effect of the value of preliminary plastic deformation viewed as an initial stress-strain state on the magnetic behavior of metal in different zones of welded pipe under subsequent elastic uniaxial tension/compression. Magnetic characteristics were measured both in a closed magnetic circuit and with the use of attached transducers along the direction of applied loading. The plastic deformation history affects the magnetic behavior of the material in different zones of welded pipe during subsequent elastic deformation, as plastic strain induces various residual stresses, and this necessitates taking into account the initial stress-strain state of products when developing magnetic techniques for the determination of their stress-strain parameters in operation.

Key words: preliminary plastic deformation, elastic uniaxial tension/compression, coercive force.
В настоящее время активно ведутся работы по созданию неразрушающих методов оценки изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) изделия при эксплуатационных нагрузках, но практически во всех работах не принимается во внимание то, что еще на стадии изготовления, а также при транспортировке изделия к месту монтажа и непосредственно при монтаже изделие может претерпевать дополнительную пластическую деформацию.

В сварных конструкциях, как правило, выделяют три зоны: основной металл, сварной шов и околошовная зона (ОШЗ). При этом, поскольку перечисленные зоны отличаются по структуре, физико-механическим свойствам, а также уровню остаточных напряжений, материал различных участков сварных конструкций в процессе изготовления, при транспортировке, монтаже и в процессе эксплуатации будет по-разному реагировать на действие приложенных нагрузок. Соответственно, и предварительная пластическая деформация будет по-разному сказываться на поведении магнитных характеристик металла различных участков сварного соединения трубы при их последующей упругой деформации.

В настоящей работе в целях определения возможностей магнитных методов для оценки параметров напряженно-деформированного состояния материала отдельных участков сварных металлоконструкций, с учетом их предыстории, было проведено исследование влияния предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик металла различных зон сварной трубы при последующей упругой деформации.

Объектом исследования служили три группы плоских разрывных образцов, вырезанных соответственно из основного металла, ОШЗ и сварного шва трубы диаметром 1420 мм, изготовленной из стали контролируемой прокатки класса прочности X70. Образцы вырезали вдоль направления прокатки штрипса, который использовали для изготовления трубы. На первом этапе исследований три группы образцов подвергали одноосному растяжению до определенных значений упругопластической деформации, которым соответствовали величины пластической деформации (δ) 0,08; 0,23; 0,49 и 1,65 % для основного металла и величины (δ) 0,23 и 1,65 % для материала сварного шва и ОШЗ. На втором этапе предварительно пластически растянутые образцы подвергали упругому растяжению (сжатию) и последующему разгружению с одновременным измерением их магнитных характеристик как в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеаметра, так и с использованием накладных преобразователей вдоль направления приложения нагрузки.

На рис. 1 (*I*, *II*, *III*) приведены зависимости магнитных характеристик от величины растягивающих напряжений, полученные на стадии пластической деформации до определенного уровня, образцов, вырезанных из основного металла, материала ОШЗ и металла сварного шва соответственно. Зависимости $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\text{макс}}(\sigma)$ для трех групп испытанных образцов, подвергнутых упругопластическому растяжению и последующему разгружению, качественно подобны. Под действием растягивающей нагрузки согласно современным представлениям о процессах, происходящих в магнитной структуре сталей при силовом воздействии, $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\text{макс}}(\sigma)$ изменяются неоднозначно, с образованием экстремумов. При разгрузке образцов после их пластической деформации происходят необратимые изменения магнитных характеристик, причиной которых являются вносимые пластической деформацией значительные остаточные напряжения. Наибольшие необратимые изменения магнитных характеристик при разгрузке после упругопластической деформации происходят в материале основного металла, а наименьшие – в металле сварного шва.

Для наглядного сравнения влияния пластической деформации на магнитные характеристики образцов из металла различных зон трубы на рис. 2 показаны зависимости значений магнитных характеристик после снятия нагрузки, приведенные к значениям в ненагруженном состоянии. $H_{c,pasrp}/H_{c,0}$, $B_{r,pasrp}/B_{r,0}$ и $\mu_{makc,pasrp}/\mu_{makc,0}$ от величины пластической деформации. С ростом пластической деформации наблюдается монотонное изменение магнитных характеристик испытанных образцов всех трех групп. Однозначный характер изменения рассмотренных магнитных характеристик с увеличением пластической деформации позволяет использовать данные параметры для определения деформированного состояния различных участков сварного соединения трубы, которое сформировалось в процессе изготовления, при транспортировке и монтаже и которое необходимо учитывать в дальнейшем, при контроле напряженно-деформированного состояния отдельных участков сварной трубы в процессе эксплуатации.



Рис. 1. Зависимости $H_c(a)$, $B_r(\delta)$ и $\mu_{\text{макс}}(e)$ от величины растягивающих напряжений при нагружении до различных величин пластической деформации с последующим разгружением: I – основной металл, δ : 1 – 0; 2 – 0,08 %; 3 – 0,23 %; 4 – 0,49 %; 5 – 1,65 %; II, III – материал ОШЗ и металл сварного шва соответственно, δ : кривые 1 – 0; 2 – 0,23 %; 3 – 1,65 %

На втором этапе предварительно пластически растянутые на разные степени образцы, вырезанные из различных участков трубы, подвергали упругому растяжению (сжатию) и последующему разгружению с одновременным измерением их магнитных характеристик. На рис. 3 (*I*, *II*, *III*) показаны зависимости магнитных характеристик образцов, изготовленных из основного металла, материала ОШЗ и сварного шва соответственно, от приложенных напряжений при упругом растяжении/сжатии после предварительного пластического растяжения на разные степени. Измерения проведены в замкнутой магнитной цепи.

При растяжении характер изменения магнитных характеристик для образцов с различным исходным НДС одинаков. Магнитные характеристики при увеличении значений растягивающих напряжений изменяются немонотонно – с образованием экстремумов. Чем больше величина предварительной пластической деформации образцов, тем больше величины напряжений, которым соответствуют эти экстремумы. Величины напряжений, при которых наблюдаются минимумы значений коэрцитивной силы (и соответственно максимумы на зависимостях $B_{\rm r}(\sigma)$ и $\mu_{\rm makc}(\sigma)$), связаны с частичным уравновешиванием внешними растягивающими напряжениями части остаточных сжимающих напряжений. Очевидно, чем больше величина предварительной пластической деформации, тем выше уровень остаточных сжимающих напряжений, а значит, большая величина приложенных напряжений, при которых наблюдаются экстремумы магнитных характеристик. Следует отметить, что зависимости магнитных характеристик от приложенных напряжений, измеренные в процессе упругого растяжения, в пределах погрешности измерений совпадают с аналогичными зависимостями, полученными при снятии нагрузки. Причем обратимый характер изменений магнитных параметров свойственен для всех образцов независимо от величины их предварительной пластической деформации.



Рис. 2. Относительные изменения магнитных параметров после разгружения от величины пластической деформации: кривые 1 – основной металл; 2 – материал ОШЗ; 3 – металл сварного шва

При упругом сжатии зависимости магнитных характеристик образцов, предварительно пластически деформированных растяжением на небольшие величины, менее 0,23 %, сохраняют монотонный характер во всем интервале сжимающих напряжений. При сжатии образцов с величинами предварительной пластической деформации 0,23 % и выше и, соответственно, с более высоким уровнем остаточных сжимающих напряжений, на зависимостях $H_{\rm c}(\sigma)$, $B_{\rm r}(\sigma)$ и $\mu_{\rm макс}(\sigma)$ наблюдаются нехарактерные для случая упругого деформирования сжатием экстремумы. Кроме того, для этих образцов наблюдаются необратимые изменения магнитных параметров при снятии нагрузки после упругого сжатия. Необратимые изменения магнитных характеристик образцов с большими величинами предварительной пластической деформации обусловлены, возможно, переходом в область развитой пластической деформации тех областей металла, где внешние сжимающие напряжения накладываются на остаточные напряжения сжатия, в результате чего суммарные напряжения превышают предел текучести. Также следует учитывать уменьшение предела текучести при испытаниях на сжатие исследованных образцов, подвергнутых предварительному пластическому растяжению (так называемый эффект Баушингера). При пластическом сжатии происходит разрушение магнитной текстуры типа «плоскость легкого намагничивания» и, соответственно, облегчение процессов перемагничивания вдоль направления сжатия. Последнее, в свою очередь, приводит к снижению значений коэрцитивной силы, вследствие чего кривая $H_{\rm c}(\sigma)$, соответствующая процессу разгрузки после сжатия, расположена ниже аналогичной кривой, полученной при нагружении.



Рис. 3. Зависимости от внешних приложенных напряжений значений $H_c(a)$, $B_r(\delta)$ и $\mu_{\text{макс}}(a)$, измеренных в замкнутой магнитной цепи: I – основной металл, δ : 1 – 0; 2 – 0,08 %; 3 – 0,23 %; 4 – 0,49 %; 5 – 1,65 %; II, III – материал ОШЗ и металл сварного шва соответственно, δ : кривые 1 – 0; 2 – 0,23 %; 3 – 1,65 %

На рис. 4 (*I*, *II*, *III*) представлены результаты исследований, проведенных с использованием накладных преобразователей: зависимости от приложенных нормальных напряжений значений коэрцитивной силы H_{c3} , а также среднеквадратичных значений напряжения *U* магнитных шумов Баркгаузена для образцов, изготовленных соответственно из основного металла, материала ОШЗ и сварного шва.

В интервале приложенных упругих напряжений примерно от -200 до 120 МПа магнитные характеристики всех исследованных образцов, изготовленных из различных зон сварного соединения и подвергнутых предварительной пластической деформации различной степени, изменяются монотонно и могут быть использованы для контроля действующих упругих напряжений в отдельных зонах сварной трубы. При этом необходимо отметить, что указанный интервал приложенных упругих напряжений перекрывает диапазон рабочих давлений в трубопроводе.



Рис. 4. Зависимости от внешних приложенных напряжений значений коэрцитивной силы $H_{c_3}(a)$ и среднеквадратичных значений напряжения $U(\delta)$, измеренных с помощью приставных датчиков: I – основной металл, δ : 1 – 0; 2 – 0,08 %; 3 – 0,23 %; 4 – 0,49 %; 5 – 1,65 %.; II, III – материал ОШЗ и металл сварного шва соответственно, δ : кривые 1 – 0; 2 – 0,23 %; 3 – 1,65 %

Таким образом, установлена корреляция между магнитными характеристиками металла различных зон сварной трубы большого диаметра из стали класса прочности X70 и степенью пластической деформации этих материалов. Определены зависимости магнитных характеристик основного металла, материалов сварного шва и околошовной зоны трубы большого диаметра от приложенных упругих напряжений одноосновного растяжения/сжатия, с учетом предыстории материалов в виде пластической деформации на различные степени.

Показано, что в диапазоне приложенных упругих одноосных напряжений от -200 до 120 МПа магнитные характеристики исследованных материалов изменяются однозначно, что позволяет использовать их для оценки напряженно-деформированного состояния отдельных зон сварных труб из стали класса прочности X70.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета исходного НДС металлоконструкций при разработке магнитных методов определения параметров их НДС.

E-mail: us@imach.uran.ru

УДК 5433.42.8 АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В СМАЗОЧНОМ МАСЛЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС)

В. Г. ДРОКОВ, В. Вл. ДРОКОВ, В. В. МУРЫЩЕНКО, Ю. Д. СКУДАЕВ Научно-исследовательский институт прикладной физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» Иркутск, Россия

UDC 5433.42.8

ATOMIC EMISSION SCINTILLATION ANALYSER FOR COMPLEX MEASUREMENTS OF PARAMETERS OF METALLIC WEAR PARTICLES IN OIL SAMPLES OF INTERNAL COMBUSTION NGINES (ICE)

V. G. DROKOV, V. VL. DROKOV, V. V. MURISHENKO, Y. D. SKUDAEV

Аннотация

Дан краткий анализ диагностических возможностей атомно- эмиссионного и рентгенофлуоресцентного методов при оценке технического состояния ДВС по величине содержания металлической примеси в смазочном масле. Приведены информационные и аналитические характеристики атомно-эмиссионного сцинтилляционного способа анализа, на примере нескольких типов автомобильных двигателей продемонстрированы его возможности. Показано, что в случае нахождения элемента одновременно в форме износных частиц и металлоорганической примеси (присадки), сцинтилляционный метод позволяет раздельно получать информацию о каждой из этих форм.

Ключевые слова:

сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ, частицы изнашивания, сцинтилляционный анализатор, диагностический параметр, моторное масло, присадка, элементный состав частицы, достоверность диагностики, форма нахождения элемента, металлоорганическая примесь.

Abstract

A brief analysis of diagnostic capabilities of atomic emission method and x-ray fluorescence method for evaluating state of internal combustion engines by measurement of metallic impurity amount in oil sample is presented. Informational and analytical features of atomic-emission scintillation method are given. Then, atomic-emission scintillation method is used to determine state of several types of automobile engines. It's shown that scintillation method allows to determine the amount of element present in particle and dissolved form in oil sample as separate values.

Key words:

atomic-emission scintillation analysis, wear particles, scintillation analyser, diagnostic feature, motor oil, oil additive, elemental composition of particle, diagnostic reliability, element in particle and dissolved form, metal-organic impurity. Опыт эксплуатации автотранспортных средств показывает, что выполнение регламентных видов технического обслуживания и ремонта не всегда повышает ресурс автомобильных двигателей и снижает вероятность отказов.

Например, отказы агрегатов с замкнутой системой смазки могут составлять в общем балансе отказов автотранспортной карьерной техники от 38 до 48 % [1]. Такая ситуация во многом определяется изменением в процессе эксплуатации автомобиля свойств смазочного масла. Для оценки смазывающих свойств и загрязненности смазочного масла используют лабораторные физико-химические и спектральные методы анализа.

Физико-химические методы обладают высокой достоверностью, позволяют оценивать качество масла и, соответственно, производить своевременную его замену. Однако данные методы не отвечают на вопрос о степени изношенности тех или иных агрегатов, остаточного ресурса двигателя. Поставленные вопросы призваны решать спектральные классические методы – атомный эмиссионный и рентгенофлуоресцентный [1–3].

Наибольшее распространение для диагностики систем, омываемых маслом, получили атомно-эмиссионные спектрометры со способом подачи пробы масла в дуговой разряд методом вращающегося электрода [4].

Представленный в работе [4] материал показывает, что несоответствие по размерам частиц металлической примеси, находящихся в стандартном образце (СО) и в анализируемой пробе (размер частиц превышает 8–10 мкм), может приводить к значительным систематическим погрешностям, которые при определении содержания, могут достигать сотен процентов. Тем не менее, в нормативных документах эти влияния не обсуждаются и не учитываются.

Следует заметить, что способ введения пробы в разряд с помощью вращающего электрода был изначально предложен для анализа растворов. Попытки анализировать этим способом пробы масла, содержащие определяемые примеси в виде износных металлических частиц сложного и, к тому же, изменяющегося гранулометрического состава являются, повидимому, не совсем оправданными.

В этой связи наилучшим применением атомно-эмиссионного метода с подачей пробы в разряд с вращающимся электродом является использование его для входного контроля при оценке содержания металлоорганической примеси, содержащейся в масле в виде присадки.

Наряду с атомно-эмиссионным методом для измерения качества масел и параметра «содержание» в пробах масел для оценки технического состояния двигателя распространение в России нашел рентгенофлуоресцентный метод анализа.

В работе [3] с помощью рентгенофлуорецентного анализа установлена эмпирическая зависимость интенсивности фона рентгенофлуоресцентных спектров моторных масел от продолжительности их работы, которая позволяет обосновать диагностический параметр для контроля качества смазочных материалов в процессе эксплуатации. В этой же работе [3] спектры измерялись в жидкостной кювете, поэтому произвести оценку величины содержания отдельных элементов не представлялось возможным, в связи с сильным влиянием фона. Такой факт является существенным ограничением данного подхода.

Для устранения влияния фона, снижения пределов обнаружения, увеличения представительности пробы используется методика осаждения износных частиц на мембранный фильтр типа Владипор [5].

В рентгеноспектральном анализе, так же как и в атомно-эмиссионном, основным условием обеспечения правильности результатов измерения, содержания металлической примеси является соответствие по физикохимическим свойствам СО и анализируемой пробы. Согласно действующей методике, градуирование рентгеновских анализаторов осуществляется СО, приготовленными на основе измельченных окислов металлов. Однако в аттестате рентгенофлуоресцентной методики, так же как и в аттестате атомно-эмиссионной, вопросы влияния несоответствия СО анализируемой пробе на величину аналитического сигнала не обсуждаются, что приводит к пропуску дефектов.

Кроме размеров частиц при рентгенофлуоресцентных измерениях имеется еще один фактор, влияющий на величину измерения массовой доли. Этот фактор связан с процессом подготовки пробы к анализу.

Дело в том, что при осаждении частиц на мембранный фильтр их количество на поверхности фильтра будет зависеть от функции распределения частиц по размерам. В некоторых случаях большая часть частиц проходит сквозь фильтр в слив. Оставшиеся на поверхности фильтра частицы могут давать величину содержания элементов не связанную с техническим состоянием двигателя [6], что может привести к ошибочной постановке диагноза.

Таким образом, использование классических спектральных методов для оценки технического состояния ДВС по величине содержания в пробе масла подвержено следующим влияниям:

– влияние способа подачи пробы в разряд вращающимся электродом, при котором аналитический сигнал формируется только за счет мелких частиц, при этом вклад крупных частиц не учитывается;

– влияние подготовки пробы (при использовании мембранного фильтра), при которой часть частиц уходит в слив и измеренная величина массовой доли может содержать значительную погрешность;

 – влияние функции распределения частиц по размерам на измеренную величину содержания. Погрешность в измерении содержания может составлять более 100 %;

– измеряется всего один диагностический параметр «содержание» элемента, что недостаточно для постановки высокодостоверного диагноза.

Следует отметить, что даже точное измерение содержания отдельных элементов не всегда гарантирует правильную оценку технического состоя-

ния двигателя, поскольку один и тот же элемент может находиться в виде присадки и в виде частиц изнашивания [4].

Разработка новых методов должна учитывать, либо снижать названные влияния и обеспечивать получение дополнительной информации о параметрах частиц изнашивания.

В последние годы разрабатывается и внедряется технология диагностирования авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) по результатам измерения параметров частиц изнашивания сцинтилляционным методом. Принцип сцинтилляционного метода подробно описан в [7].

Достоверность результатов диагностики авиационных ГТД по результатам сцинтилляционных измерений составила порядка 90 % с точностью до узла, что подтверждено заводской разборкой [8].

Сцинтилляционный анализатор, разработанный для диагностики авиационных ГТД, позволяет при аналитическом объеме пробы в 1 см³ за время 20 минут получить следующую информацию по 8 элементам (Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, Ag, V):

 содержание элемента, находящегося в масле в составе частиц изнашивания (размер частиц более 2 мкм);

 содержание элемента, растворенного в масле (присадки) и(или) содержащегося в виде субмикронных частиц (размер частиц менее 2 мкм);

- число «простых» частиц, состоящих только из одного элемента;
- число «сложных» частиц, состоящих из двух и более элементов;
- общее число зарегистрированных частиц;
- средний размер частиц данного элемента в пробе;
- элементный состав каждой износной частицы.

В качестве источника возбуждения спектров в анализаторе используется конструкция СВЧ плазмотрона циклонного типа, которая обеспечивает пропорциональную связь между аналитическим сигналом и параметрами частиц в диапазоне их размеров от 2 до 80 мкм.

В качестве плазмообразующего газа используется сжатый воздух. Применение воздуха является положительным моментом, поскольку, вопервых, не требует доставки и применения более дорогих газов – азота и аргона, а, во-вторых, является окислителем при сжигании масла. С другой стороны, состав плазмообразующего газа определяет температуру плазмы, она составляет порядка 5500 К. Такая температура накладывает ограничения на выбор анализируемых элементов, который ограничен потенциалом возбуждения линий и не превышает 5,0 эВ.

В процессе анализа пробы в режиме реального времени блок обработки информации сцинтилляционного анализатора формирует протокол результатов измерений, форма которого приведена в работе [9].

Полученные результаты по параметрам частиц автоматически сравниваются с соответствующими параметрами статистической модели эталонного двигателя, сформированного на основании статистической обработки массива данных исправных двигателей, находящихся в эксплуатации. Различие между эталонным и исследуемым двигателями сопоставляют с вероятными изменениями технического состояния.

Цель настоящей работы заключалась в конструктивной и методической адаптации сцинтилляционного анализатора под анализ автомобильных масел и демонстрации его диагностических возможностей.

При анализе автомобильных масел были дополнительно выведены еще 4 элемента (Mn, Mo, Ti, Si), усовершенствовано программное обеспечение.

В рамках исследований были проанализированы пробы масел, отобранные из картера ДВС автомобилей Лада Гранта, 2015–2016 гг. выпуска.

№ пробы	10035	10043	10042	10040	10036	10044	10037	10039	10041	10038
Пробег, км Кол-во частиц, см ⁻³	6084	16987	49588	60339	64352	77723	78510	102583	113702	117755
Al	52	8292	13	13	5	19	9	77	18	34
Cr	13	85	59	83	11	34	46	2945	203	334
Ni	15	2934	14	33	12	20	39	21	24	21
Mg	49438	41472	40378	33696	33442	37529	32383	45602	42510	44271
Fe	1205	49888	12371	12823	897	120	5175	48597	1148	7170
Cu	22	20692	36	9	12	12	6	252	6	17
Ag	0	2	0	1	1	1	0	3	0	2
V	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Mn	23	6408	37	26	14	12	10	203	12	35
Мо	63905	1491	41707	51444	52821	50658	48078	48796	53661	53585
Ti	8	7	6	6	5	7	3	8	6	4
Si	2	4	1	4	3	3	2	4	1	3

Табл. 1. Количество частиц, зарегистрированных в пробах масел марки №1

Результаты анализа расположены в порядке увеличения наработки двигателя с начала его эксплуатации. В табл. 1 представлены результаты анализа проб с 10 автомобилей, работающих на масле №1, все двигатели работали на газе. В табл. 2 представлены результаты анализа с семи автомобилей, работающих на масле марки №2, при этом два с бензиновыми двигателями.

Сравнение между собой соответствующих данных в табл. 1, 2 показывает, что при сопоставимых пробегах автомобилей количество износных частиц в двигателях, использующих масло №2, по большинству элементов, в несколько раз меньше, чем в двигателях, использующих масло №1, что указывает на лучшие смазочные свойства масла №2.

В табл. 1 имеется проба (№10043, пробег 16987 км), в которой наблюдается более низкое количество частиц Мо и более высокое количество частиц Fe, Mn, Cu.

№ пробы	10050	10051	10046	10049	10047	10045	10048
Пробег, км Кол-во частиц, см ⁻³	4387	6520	53780	82792	10981 9	11685 0	180550
Al	12	116	9	5	23	7	9
Cr	6	2	14	7	74	34	23
Ni	5	6	13	4	11	10	4
Mg	8582	15606	7174	6328	4062	7611	5920
Fe	512	12399	186	8978	602	16838	92
Cu	15	357	3	10	46	2	13
Ag	0	0	0	2	0	0	4
V	1	1	0	1	0	1	0
Mn	14	16	13	13	15	15	21
Мо	7220	260	7218	2255	3079	2087	4864
Ti	4	4	2	5	3	3	5
Si	2	0	1	1	3	1	2

Табл. 2 Количество частиц, зарегистрированных в пробах масел марки №2

Рассмотрим подробнее результаты анализа по данному двигателю. Фрагмент протокола сцинтилляционных измерений частиц изнашивания для пробы №10043В приведен табл. 3.

В табл. 3: N – общее количество зарегистрированных частиц; N_{np} – общее количество одноэлементных частиц: C_p – содержание элемента в металлоорганической форме либо в виде частиц размером менее 2 мкм; $C_{\rm q}$ – содержание элемента в частицах износа размером более 2 мкм; D – средний размер частиц.

Результаты табл. 3 показывают, что повышенному износу, вероятнее всего, подверглись детали, выполненные из сплава с присутствием марганца. Под это подходит группа марганцовистых сталей 15Г, 20Г, 40Г, 35Г2. Согласно ГОСТ 4543-71 данные стали используются для изготовления валов, шестерней, коленчатых валов и других нагруженных деталей.

Элемент	N, см3	Nпр, см3	Ср, г/т	Сч, г/т	С, г/т	D, мкм			
Al	8292	74,5	4,75	0,21	4,96	2,58			
Cr	85	0,5	0,02	0	0,02	1,56			
Ni	2934	15,5	1,07	0,04	1,11	1,38			
Mg	41472	4779,5	3,5	1,63	5,13	3,5			
Fe	49888	20181,5	31,72	29,06	60,78	5,21			
Cu	20692	294,5	3,82	0,17	3,98	1,2			
Ag	2	0	0	0,02	0,02	7,51			
V	0	0	0	0	0	0			
Mn	6408	79,5	1,82	0	1,82	0			
Мо	1491	100	1,98	0	1,98	0			
Ti	7	3	0	0	0	0			
Si	4	0,5	0	0	0	0			
Состав сложных	Количество								
-Mg-Fe	14	4166,5							
-Mg-Fe-Cu 7787									
-Mg-Cu		2389							
-Al-Mg-Fe-Cu		2055							
-Al-Mg-Fe-Cu-Mr		1411							
-Mg-Fe-Cu-Mn		1067							
-Al-Ni-Mg-Fe-Cu-	804,5								
-Al-Mg-Cu	721								
-Al-Mg-Cu-Mn 552									
-Al-Ni-Mg-Cu-Mr	-Al-Ni-Mg-Cu-Mn 373								
-Mg-Cu-Mn	-Mg-Cu-Mn 363								

Табл. 3. Фрагмент протокола сцинтилляционных измерений параметров частиц в пробе №10043

Можно предположить, что повышенному износу подвергся коленчатый вал с подшипниками скольжения, который был обусловлен (износ) низким количеством противоизносной присадки на основе молибдена.

Несмотря на то, что по Fe, Cu, Mn получились достаточно высокие значения по количеству зарегистрированных частиц, величина содержания по этим элементам не превышает критических ($C_{Fe}=60,78$ г/т, $C_{Cu}=3,98$ г/т). Значения содержаний для исправного двигателя по данным элементам $C_{Fe}\sim50$ г/т, $C_{Cu}\sim5$ г/т. Вероятнее всего, в данном двигателе обнаружен дефект на ранней стадии его развития.

В табл. 4 приведены сведения по количеству частиц изнашивания в работающем масле двигателя с указанием его мощности и пробега автомобиля.

Марка авто, год выпуска, про- бег, мощность	Al	Cr	Ni	Mg	Fe	Cu
Тоуоta Cresta, 1996 г/в, 220 л/с, 339000 км	10	84	23	28280	1434	2924
Nissan March, 2001 г/в, 108 л/с, 120000 км	17	313	28	27200	29800	19100
Тоуоta Land Cruiser, 1999 г/в, 250 л/с, 202000 км	3	5	8	27730	440	25
Mitsubishi Pajero, 2008 г/в, 200 л/с, 84000 км	4	12	23	20730	900	110

Табл. 4. Количество зарегистрированных частиц износа по элементам Al, Cr, Ni, Mg, Fe, Cu, в автомобилях иностранных производителей

Табл. 4 показывает, что независимо от года выпуска автомобиля и мощности его двигателя количество зарегистрированных частиц Mg находится в диапазоне 20000–28000 см⁻³. Вместе с тем, количество частиц Fe, Cr, Ni, Cu коррелирует с мощностью и пробегом автомобиля. Так, при пробеге в 202000 км (мощность 250 л/с) Land Cruiser оказался самым «чистым» автомобилем по сравнению с другими. Особенно это заметно в сравнении с автомобилем Nissan March (пробег 120000 км, мощность 108 л/с), двигатель которого был отправлен на капитальный ремонт.

Выводы

1. Сцинтилляционный метод позволил успешно использовать при оценке технического состояния ДВС в качестве диагностических признаков содержание элементов, концентрацию и состав металлических частиц в работающем масле двигателя.

2. Метод позволил по параметрам частиц изнашивания качественно оценить смазочные свойства двух марок моторных масел.

3. По величине параметров, в частности по содержанию элементов, получены их количественные значения, не противоречащие литературным данным.

4. Метод позволяет контролировать количество элементов в присадках и их влияние на смазочные свойства масла.

5. Измерение элементного состава частиц позволило в одном из двигателей выявить вероятный узел повышенного износа.

6. Для легковых автомобилей выявлена зависимость интенсивности износных процессов от номинальной мощности двигателя. Интенсивность износа значительно выше у двигателей с меньшей мощностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов, Ю. А. Методология диагностики агрегатов автомобилей электрофизическими методами контроля параметров работающего масла : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск : 2015. – 43 с.

2. [Электронный pecypc] ww.studfiles,ru/preview/5964045/p.20-29.

3. **Латышев, А. А.** Методические вопросы спектрального контроля состава масел / А. А. Латышев, Г. И. Суранов // Заводская. лаб. №7. – 2011. – Т. 77. – С. 19–24.

4. **Иноземцев, А. А.** Состояние и перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. Влияние технологий спектральных измерений массовой доли элементов в частицах изнашивания на результаты диагностирования узлов трения авиационных газотурбинных двигателей / А. А. Иноземцев [и др.] / Контроль. Диагностика. – 2011. – № 2 (152). – С 32–39.

5. Степанов, В. А. Разработка и исследование методов и средств комплексной диагностики смазываемых узлов трения по параметрам продуктов износа в масле : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М. : 2000. – 40 с.

6. Юдин, А. Н. Рекомендации по нормированию критериев оценки узлов трансмиссии ГТД, по результатам спектрального анализа масла / А. Н. Юдин, В. А. Степаков // Конверсия в машиностроении. – 2002. – № 2. – С. 35–41.

7. Иноземцев, А. А. Состояние, перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 3. Сцинтилляционный атомно-эмиссионный способ измерения параметров металлических частиц в пробах авиационных масел / А. А. Иноземцев [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 6 (156) – С. 14–27.

8. Техническая справка №44-517141. Двигатели Д-30КП/КУ/КУ154, имевшие неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом, при контроле сцинтилляционным методом за период 2000–2007. – Рыбинск, ПАО "НПО "СА-ТУРН", 2008. – 15 с.

9. Дроков, В. Г. Повышение достоверности диагностирования ГТД сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М. : 2009. – 42 с.

УДК 621.798.08 + 637.14 КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТАРОУПАКОВОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

И. П. ЗАВАЛЬНЮК

Херсонский государственный аграрный университет Херсон, Украина

UDC 621.798.08 + 637.14

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF DAIRY PRODUCTS PACKAGING CONTROL *I. P. ZAVALNIUK*

Аннотация

В статье отмечается актуальность контроля физико-механических свойств упаковочных материалов и потребительской тары с целью обеспечения безопасности молочной продукции. Проанализированы контролируемые показатели тароупаковочных материалов в условиях молокоперерабатывающих предприятий. Установлены функциональные особенности современных систем контроля качества упаковки.

Ключевые слова:

тароупаковочные изделия, герметичность, механическая прочность, химическая инертность, карта входного контроля, измерительные испытания, система контроля качества.

Abstract

The article highlights the relevance of controlling the physical and mechanical properties of packaging materials and consumer packaging in order to ensure the safety of dairy products. Controlled indicators of packaging materials in conditions of milk processing enterprises are analyzed. Functional features of modern packaging quality control systems are determined.

Key words:

packing products, impermeability, mechanical strength, chemical inertness, entrance control card, measuring tests, quality control system.

Постановка задачи

На сегодняшний день для широкого ассортимента молочной продукции различной консистенции, функционального назначения, сроков хранения и реализации существует большое разнообразие упаковочных материалов и потребительской тары, которая отличается видом используемых материалов, их структурой, технологией изготовления, способами фасовки и укупорки.

Например, питьевое пастеризованное молоко разливают в пакеты из полиэтиленовых пленок, многослойных комбинированных материалов на основе картона и бумаги, стеклянные и полимерные бутылки; кисломо-

лочные продукты – в пакеты из комбинированных материалов на основе картона или термоформованной и выдувной упаковки из полистирола и полипропилена, которые укупориваются крышками из этих же материалов или из алюминиевой фольги; сыр фасуют в вакуумную полимерную упаковку, а также используя латексные покрытия; молочные консервы, как правило, разливают в банки из белой жести, стекла и емкости из полистирола.

К тароупаковочным материалам и изделиям молочной продукции предъявляются более жесткие требования, чем для других пищевых продуктов, а именно [1]:

1) большая механическая прочность;

2) высокая степень герметичности, т. е. непроницаемость и устойчивость к действию микроорганизмов, максимальные водо-, газо-, паро- и ароматонепроницаемость, значительная термоустойчивость;

3) жесткость или эластичность в зависимости от функционального назначения упаковки, вида фасовочно-упаковочного оборудования;

4) устойчивость к старению;

5) низкая светонепроницаемость, обуславливающая защитные свойства упаковочных материалов;

6) химическая инертность упаковочных и укупорочных материалов по отношению к продукту, т.е. отсутствие выделения и миграции вредных для здоровья человека веществ.

Цель исследования

В связи с существующим разнообразием тароупаковочных изделий большой интерес представляет исследование способов и средств контроля их физико-механических свойств.

Решение задачи

В условиях молокоперерабатывающих предприятий с целью контроля качества и безопасности материалов и упаковки периодически проводят испытания в соответствии с, так называемой, картой входного контроля тароупаковочных материалов (табл. 1).

N n/n	Наименование материалов	Контролируемые показатели					
1	Полимерные материалы	Органолептические: запах, привкус водной вытяжки					
	Полистирол	Внешний вид, толщина, ширина					
	Полистирольный стаканчик	Внешний вид, диаметр стакана, диаметр дна,					
		высота, адгезия печати, тест на царапанье					
	Пленка ПВХ	Внешний вид, толщина, ширина					
	Пленка термоусадочная	Внешний вид, толщина, ширина					
	Рукав полиэтиленовый	Внешний вид, толщина, ширина					
2	Фольга алюминиевая	Запах, внешний вид, толщина, ширина, масса					
		лакокрасочного покрытия, непрерывность ла-					
		кокрасочного покрытия, пористость, адгезия					
	*	лакокрасочного покрытия, смачиваемость					
3	Фольга кашированная	Запах, внешнии вид, намотка, ширина, адге-					
		зия лакокрасочного покрытия, масса і м,					
1	Пергамент	эксплуатационная надежность					
-	пергамент	вость краски сорность жиропроницаемость					
		кислотность, массовая лоля влаги					
5	Комбинированный материал	Органолептические: запах, привкус, внешний					
	L L	вид вытяжек, внешний вид материала.					
		Намотка, ширина, толщина, влажность, гер-					
		метичность, степень адгезии, окисленность					
		полиэтиленового покрытия, прочность за-					
		крепления печатного рисунка.					
6	Жестяная банка	Внешний вид, вместимость, герметичность,					
		стоикость лакокрасочных покрытии банок и					
		крышек при стерилизации, толщина жестяной					
7	Стекланная тара	лопты Внешний вид размеры сопротивление уси-					
/	Стеклянная тара	пию сжатия киспотостойкость оксилометал-					
		лическое покрытие, сопротивление усилию					
		царапанья, обжиг					
8	Металлические крышки	Внешний вид, размеры, герметичность уку-					
	-	поривания, химическая стойкость лакокра-					
		сочного покрытия					
9	Короба молочные	Внешний вид, длина, ширина, высота					
10	Мешки бумажные	Внешний вид, длина, ширина, ширина изгиба					

Табл. 1. Карта входного контроля тароупаковочных материалов [2]

Свойства тары и упаковки, определяющие функциональные, эстетические, эргономические, экологические требования, а также требования надежности и безопасности определяются многими методами (рис. 1) [3].



Рис. 1. Классификация методов испытаний

Основными барьерными свойствами упаковки молочной продукции, обеспечивающими ее качество и безопасность, являются механическая прочность, герметичность и химическая стойкость.

Механическая прочность тары и упаковки зависит в основном от используемого материала, условий транспортировки и хранения, отклонение которых от требуемых может привести к деформации тары, ее сплющиванию и продавливанию.

Измерительные испытания упаковки на прочность проводят с целью проверки способности упаковки выдерживать статические нагрузки, обеспечивать защиту продукции от механических повреждений при транспортировании и погрузочно-разгрузочных работах, а также для определения дополнительных требований к способам укупорки тароупаковочных изделий.

Современные системы контроля качества упаковки (рис. 2) позволяют, и в условиях лаборатории и в условиях производства оценивать герметичность, прочность швов, наличие трещин и сколов на наружной и внутренней поверхностях тары, присутствие посторонних объектов, загрязненность тары.

Примером настольной – лабораторной системы контроля упаковок может служить установка LIPPKE 4500 [4], позволяющая осуществлять контроль герметичности, прочности швов гибкой, полужесткой и жесткой упаковок, определять размер и место микроутечек, проводить тест на разрыв упаковки.



Рис. 2. Обобщенная структура системы контроля качества упаковки: 1 – блок подачи упаковки на испытательную площадку; 2 – испытательный блок; 3 – контролируемая упаковка; 4 и 5 – блоки приема дефектных и не дефектных упаковок (по результатам контроля); 6 – микропроцессорное контролирующее устройство; 7 – блок подачи физического контрольного воздействия; $u_1...u_5$ – управляющие воздействия; f – физическое контрольное воздействие на упаковку (оптическое, акустическое и т. д.); P – общее количество упаковок; P_+ (P_-) - количество упаковок прошедших (не прошедших) испытательный контроль

В качестве примера современных производственных потоковых систем, осуществляющих контроль качества тары в широком диапазоне свойств и характеристик, на технологических линиях производства пищевых продуктов можно рассмотреть машины HEUFT InLine, HEUFT Spectrum, HEUFT VX и HEUFT Basic [5]. Так, инспекционная машина HEUFT InLine разработана для полноценного контроля стеклянных и пластиковых емкостей перед розливом. Компактный инспектор пустых емкостей распознает с высокой точностью дефекты стекла, посторонние объекты и загрязнения. HEUFT InLine, инспектирует дно, горло и боковые стенки емкости на 360°, полностью охватывая весь ее объем.

Машины Heuft Spectrum, Heuft VX и Heuft Basic обеспечивают контроль качества и безопасности упаковки пищевых продуктов, в частности, стеклянной тары, тары из ПЭТФ, банок из жести или алюминия. Инспекторы Heuft осуществляют следующие операции:

1) вывод дефектной тары из производственного потока;

2) выявление номера наливных трубок, которые систематически недоливают, укупорочных головок, которые систематически не докручивают колпачки;

3) отбор образцов тары для испытания в лаборатории;

4) отбраковка разорвавшейся бутылки;

5) определение недолива и перелива продукции;

6) контроль наличия крышки и качества укупоривания;

7) контроль герметичности, наличия вакуума или кислорода.

Выводы

В условиях интенсификации технологических процессов молокоперерабатывающих предприятий большое значение имеет наличие эффективных современных систем контроля качества упаковки, позволяющих проводить контроль физико-механических свойств тароупаковочных изделий. Одним из необходимых функциональных возможностей является способность проводить неразрушающий контроль упаковок не только в лабораторных условиях, но и на производстве, в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАРЫ

1. Сирохман, І. В. Товарознавство пакувальних товарів і тари / І. В. Сирохман, В. М. Завгородня. – К. : Центр учбової літератури, 2009. – 616 с.

2. Меркулова, Н. Г. Производственный контроль в молочной промышленности: практ. рук. / Н. Г. Меркулова, М. Ю. Меркулов, И. Ю. Меркулов. – СПб. : ИД «Профессия», 2010. – 656 с.

3. **Трыкова, Т. А.** Товароведение упаковочных материалов и тары / Т. А. Трыкова. – М. : Дашков и Ко, 2008. – 146с.

4. Lippke 4000/4500 for Leak and Seal Strength Testing [Электронный реcypc] – Режим доступа к сайту: http://dansensor.com/products/leak-detectors/lippke-4000-4500. – Название с экрана.

5. HEUFT InLine. Covering everything: continuous empty container inspection. [Электронный pecypc] – Режим доступа к сайту: https://heuft.com/en/product/food/empty-container-food/empty-container-inspectionheuft-inline-food. – Название с экрана.

E-mail: zavalnyukinna@rambler.ru

УДК 533.275.08:543.712.08 ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОЙ КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ

В. И. ЗУБКО, Д. В. ЗУБКО, Г. Н. СИЦКО

Белорусский государственный университет Минск, Беларусь

UDC 533.275.08:543.712.08 ELECTROELASTIC CONTROL ELECTRIC PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES V. I. ZUBKO, D. V. ZUBKO, G. N. SITSKO

Аннотация

Разработаны новые композиты, в которых в качестве связующего использован переработанный вторичный полиэтилен, а наполнителями служат порошкообразное углеродное волокно или порошкообразная резина. Разработан электроемкостной метод и исследованы электрические свойства композитов в зависимости от содержания и типа наполнителя в диапазоне частот электрического поля 50 Гц–1 МГц.

Ключевые слова:

электроемкостной метод, полимерный композит, вторичный полиэтилен, порошкообразное углеродное волокно, порошкообразная резина.

Abstract

Developed new composites in which the binder used secondary recycled polyethylene, while the fillers are powdered carbon fiber or powdered rubber. Developed electroelastic method and investigated the electrical properties of composites depending on the content and type of filler in the frequency range of the electric field of 50 Hz–1 MHz.

Key words:

electroelastic method, polymer composite, secondary polyethylene, powdered carbon fiber, powdered rubber.

По прогнозам Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992) объем твердых отходов к 2025 г. вырастет в 4–5 раз. В настоящее время в мире скопилось около 100 млн. тонн автопокрышек, отработавших свой ресурс. Автопокрышки, вышедшие из эксплуатации, являются одними из самых многотоннажных полимерных отходов потребления. Только в странах ЕС их количество превышает 30 млн т. При этом уровень их вторичного использования не превышает 5 % [1].

В то же время переработанная резина может быть использована в качестве токопроводящего наполнителя для получения новых полимерных композитов с заданными электропроводящими свойствами. В 2008 г. объемы пластиковых отходов в Западной Европе составили 24,9 млн т. Опыт стран ЕС по контролю за образованием отходов показал, что между ростом валового внутреннего продукта (ВВП) и ростом отходов существует прямая зависимость [2, 3]. Увеличение объема твёрдых отходов в мире делает актуальной задачу их использования для производства новой продукции. Получение композитов на основе переработанных полимерных отходов с различными наполнителями, открывает перспективу использования их в электротехнической промышленности в качестве электроизоляционных либо электропроводящих материалов. При этом эти материалы будут значительно дешевле, чем материалы на основе первичных полимеров, например, первичный полиэтилен [3].

Применение ЭМ контроля электрических свойств полимерных композитов совместно с традиционными испытаниями позволяет повысить достоверность диагностики при комплексном обследовании высоковольтного электрооборудования.

Разработка электроемкостного метода (ЭМ) контроля и диагностики электрических свойств полимерных композитов (ПК) на основе вторичного полиэтилена (ВПЭ) обусловлена необходимостью их тестирования на соответствие комплекса их диэлектрических показателей, таких как: относительная диэлектрическая проницаемость (\mathcal{E}'); удельная электрическая проводимость (σ); тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) нормам, регламентированным стандартами. О необходимости проведения испытаний ПК на диэлектрические показатели подтверждают ГОСТы 22372-77, 20437-89, 982–80, 6581–75.

В результате проведенных исследований установлено, что параллельная эквивалентная схема конденсатора, заполненного материалом, с потерями более адекватно отражает реальные электрические свойства материала в сравнении с последовательной эквивалентной схемой. На рис. 1 представлена параллельная эквивалентная схема конденсатора, заполненного материалом с потерями.



Рис. 1. Параллельная эквивалентная схема конденсатора, заполненного материалом с потерями: g – активная электрическая проводимость материала с потерями; c_{Π} – «паразитная» электроемкость конденсатора; $c = c_0 \varepsilon'$ – электроемкость конденсатора, заполненного материалом с потерями; c_0 – геометрическая емкость конденсатора; ε' – относительная диэлектрическая проницаемость материала На основе анализа параллельной эквивалентной схемы получены формулы для определения электрических показателей, таких как: \mathcal{E}' , $tg\delta$, σ полимерных композитов в диапазоне частот 100 Гц–1 МГц [4].

$$\varepsilon' = \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\sin|\varphi|}{z} - \frac{1}{z_0} \right) + 1, \qquad (1)$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \cos|\varphi|}{\sigma^2},\tag{2}$$

$$tg\delta = \frac{\cos|\varphi|}{z\omega\varepsilon'c_0},\tag{3}$$

где z_0 – полное сопротивление конденсатора без материала; z – полное сопротивление конденсатора с материалом; φ – угол сдвига фаз между током и напряжением; $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \, \Phi/\text{M}$ – электрическая постоянная.

С учетом краевых эффектов электродов из уравнения (1) получена формула определения геометрической емкости измерительного пространства конденсатора:

$$_{0} = \frac{1}{\omega(\varepsilon_{1} - 1)} \left(\frac{\sin \varphi_{1}}{z_{1}} - \frac{1}{z_{0}} \right) , \qquad (4)$$

где ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость эталонной пластины; ϕ_1 – угол сдвига фаз между током и напряжением при заполнении конденсатора эталонной пластиной; z_1 – полное сопротивление конденсатора с эталонной пластиной.

На рис. 2 показана фотография разработанного электроемкостного преобразователя контроля и диагностики комплекса диэлектрических свойств композитов [5].

Конструкция электроемкостного преобразователя для определения диэлектрических показателей композиционных материалов по сравнению с известными аналогами [6–8] обладает следующими преимуществами:

1) получение информации о комплексе величин диэлектрических показателей (относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, удельного объемного электрического сопротивления) ПМ в диапазоне частот 100 Гц–1 МГц;

2) обеспечение высокой степени параллельности между двумя электродами;

3) определение толщины пластин от 0,1 до 6,0 мм непосредственно в измерительном пространстве с точностью 0,005 мм;

4) обеспечение однородного электрического поля в контролируемом пластинчатом изоляционном материале в диапазоне частот электрического тока 100 Гц–1 МГц;

5) малая величина диэлектрических потерь ячейки 1,8 ·10⁻⁵;

6) высокое сопротивление изоляции прокладки 10¹⁶-10¹⁷ Ом.



Рис. 2. Электроемкостной преобразователь контроля комплекса электрических свойств полимерных композитов: 1 – микрометрическое устройство; 2 – дисковые электроды; 3 – измерительное пространство; 4 – фторопластовые прокладки; 5 – съемные контакты; 6 – основание из оргстекла

На рис. 3 показана фотография созданной экспериментальной установки контроля комплекса электрических свойств композитов.



Рис. 3. Экспериментальная установка контроля комплекса электрических свойств полимерных композитов: высокочувствительный электроемкостной преобразователь; измеритель иммитанса; персональный компьютер

Технология получения композитов на основе вторичного полиэтилена (ВПЭ), в которых наполнителем служит ПУВ, состоит в следующем. На обогреваемые микровальцы помещают при температуре 115–120 °C определенное количество ВПЭ в виде дробленки, к ней добавляют порциями ПУВ, далее смесь перемешивают в течение 5–7 мин до получения однородной массы. В результате из вальцевого полотна методом прессования

на электрообогреваемом прессе при 160–170 °С в течение 15–20 мин формируется пластина композита с заданными размерами [9]. Аналогичные операции проводятся при использовании в качестве наполнителя ПР [10].

Результаты исследований показали характерное повышение удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ с возрастанием частоты, при различном содержании ПУВ (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от частоты электрического тока (t = 20 °C): изменение σ при ПУВ/ВПЭ = 50(1), 40(2), 30(3), 20(4) и 10 мас. % (5)

Из рис. 5 видно, что при увеличении содержания ПУВ в композите от 20 до 50 % значительные изменения на частоте 1 МГц претерпевает величина σ , повышается на 4 порядка: от 10⁻⁵ до 10⁻¹ Ом⁻¹·м⁻¹ [9].



Рис. 5. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от содержания ПУВ. Частота, на которой проводили измерения составляла 1 МГц

Исследовано влияние содержания ПР на диэлектрических свойств композитов на основе ВПЭ. Из рис. 6, 7 видны характерные понижения величин ε и tg δ и возрастание значений σ композитов с увеличением частоты электрического тока.



Рис. 6. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости (*a*) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) композитов на основе ВПЭ от частоты электрического тока при различном содержании ПР (t = 20 °C): 1–85 мас.%; 2–50 мас.%; 3–25 мас.%



Рис. 7. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от частоты электрического поля при различном содержании ПР (t=20 °C): 85(1); 70(2); 60(3); 50(4) и 25 мас. % (5)

Из рис. 8 видно, что удельная электрическая проводимость при повышении содержания ПР в композите от 30 до 85 мас.% на частоте 1 МГц возрастает примерно на 3 порядка: от 10⁻⁵ до 10⁻² Ом⁻¹·м⁻¹ [9].



Рис. 8. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от содержания ПР. Частота, на которой проводили измерения составляла 1 МГц

Таким образом, разработан электроемкостной метод и исследованы электрические свойства новых полимерных композитов на основе переработанного вторичного полиэтилена в зависимости от содержания и типа наполнителя в диапазоне частот 100 Гц–1 МГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. http://giprocement.ru/about/articles.html/p=6
- 2. http://www.solidwaste.ru/publ/view/341.html
- 3. http://www.plastinfo.ru/information/articles/283/page2/

4. **Зубко, В. И.** Импедансный метод контроля и диагностики качества электроизоляционных материалов, используемых в электротехнической промышленности / В. И. Зубко, Д. В. Зубко, Г. Н. Сицко // Изв. НАН Беларуси. – Сер.физ.- техн. наук.– 2016. – №3. – С. 21–26.

5. Пат. на полезную модель №9001 Республика Беларусь. Устройство для измерения электрических свойств полимерных композиций / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. – № и 20120669 ; заявл. 07.10.12 ; опубл. 28.03.13.

6. **Матис, И. Г.** Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля / И. Г. Матис. – Рига : Зинатне, 1982. – 302 с.

7. Бугров, А. В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества / А. В. Бугров. – М. : Машиностроение, 1984. – 94 с.

8. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – М. : Техносвера, 2007. –384 с.

9. Пат. на изобретение № 11018 Республика Беларусь. Электропроводящая полимерная композиция / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. – № а 20070558 ; заявл. 14.05.07 ; опубл. 30.08.08.

10. Пат. на изобретение № 13803 Республика Беларусь. Электропроводящая полимерная композиция / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. – № а 20081339 ; заявл. 23.10.08 ; опубл. 30.12.10.

УДК 535.51 СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЕНОК

И. В. ИВАШКЕВИЧ, Н. И. СТАСЬКОВ, *В. В. ФИЛИППОВ, *Б. Г. ШУЛИЦКИЙ, *И. А. КАШКО

УО «Могилёвский государственный университет им. А. А. Кулешова»

*УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Могилев, Минск, Беларусь

UDC 535.51

SPECTRAL ELLIPSOMETRY OF PERUVIZITE FILMS I. V. IVASHKEVICH, N. I. STASKOV, V. V. PHILIPPOV, B. G. SHULITSKY, I. A. CASCO

Аннотация

Методом спектральной эллипсометрии получены дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения пленок PEDOT:PSS и йодсвинцового перовскита.

Ключевые слова:

спектральная эллипсометрия, электродинамическая модель, перовскит.

Abstract

Obtained dispersion dependence of the refractive index and absorption of films of PEDOT:PSS and iodine-lead perovskites of method of spectroscopic ellipsometry.

Key wods:

spectral ellipsometry, electrodynamic model, perovskites.

В настоящее время в солнечной энергетике наиболее перспективными являются солнечные ячейки на основе металлоорганических перовскитов вида (RNH3)ВХ3 (где R – CnH2n+1, X – I, Br или Cl и B – Pb или Sn). Поэтому стоит задача о разработке наиболее эффективного метода получения перовскитных плёнок. Для выбора и контроля наиболее оптимальных условий и режимов формирования плёнок необходимы сведения об оптических свойствах получаемых пленок. Среди оптических методов неразрушающего контроля высокой чувствительностью отличается спектральная эллипсометрия, которая позволяет определять дисперсию оптических характеристик исследуемых плёнок и слоистых систем.

В данной работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований систем поли (3, 4-этилендиокситиофен): полистиролсульфонат (PEDOT:PSS) – стеклянная подложка и йод-свинцовый перовскит (CH₃NH₃PbI₃) – PEDOT:PSS – стеклянная подложка на спектральном эллипсометре ES-2 (ФГУП СКБ ИРЭ РАН, Россия). Пленки PEDOT:PSS являются зарядово-транспортными слоями, отделяющими активный слой солнечной ячейки от электрода. Кроме того, пленки PEDOT:PSS должны иметь высокую адгезию к перовскиту, чтобы избежать потерь на их границе. При измерении спектров на эллипсометре использовалась иммерсия для устранения лучей, отраженных от нижней поверхности стеклянной пластины. На рис. 1 представлены экспериментальные спектры исследуемых систем.



Рис. 1. Экспериментальные спектры $tg\Psi(\lambda)$ и $cos\Delta(\lambda)$ исследуемых систем: кривые 1 – спектры системы PEDOT:PSS – стеклянная подложка при угле падения 60°; кривые 2, 3 – спектры системы перовскит – PEDOT:PSS – стеклянная подложка при углах падения 60° и 65° соответственно

Для получения пленок PEDOT:PSS стеклянные подложки были погружены на 5 мин в хромпик для придания поверхности гидрофильных свойств. Затем подложки были отмыты в дистиллированной воде. Пленка PEDOT:PSS была сформирована методом центрифугования из трёхпроцентного водного раствора поли (3, 4-этилендиокситиофен): полистиролсульфонат. Скорость вращения центрифуги 5000 об/мин. Образцы были подвергнуты отжигу в вакууме 30 мин (3–10 Па) при температуре 150 °C.

Пленки перовскита были получены методом жидкофазной экстракции путем нанесения раствора перовскита на подложку методом центрифугирования. Вместо обычного термического отжига подложку погружали в ванну с другим растворителем. Это приводило к эффективной экстракции растворителя из перовскитного прекурсора и индуцировало быструю кристаллизацию однородных тонких пленок перовскита. Преимущества метода жидкофазной экстракции: процесс проводится при комнатной температуре, быстрая кристаллизация, равномерное нанесение, контроль толщины пленки, гладкость пленок и универсальность составов перовскитных прекурсоров. Толщина полученной пленки регулировалась изменением концентрации раствора перовскита.

Для системы PEDOT:PSS – стеклянная подложка методом наименьших квадратов были получены решения обратной задачи спектральной эллипсометрии для следующих моделей: 1) однородный слой $(d_1, N_1 = n_1 - ik_1)$ на подложке (N = n - ik);

2) два слоя $(d_1, N_1 = n_1 - ik_1, d_2, N_2 = n_2 - ik_2)$ на подложке (N = n - ik), параметры одного из которых позволяли учесть поверхностный слой на пленке либо переходный слой между пленкой и подложкой;

3) три слоя (d_1 , $N_1 = n_1 - ik_1$, d_2 , $N_2 = n_2 - ik_2$, d_3 , $N_3 = n_3 - ik_3$) на подложке (N = n - ik). В этом случае электродинамическая модель допускает, что пленка окружена поверхностным и переходным слоями.

При этом поверхностный и переходный слои моделировались двухкомпонентным слоем (модель Максвелла–Гарнетта) с различным процентным содержанием граничащих сред (воздух/пленка – для поверхностного и пленка/подложка – для переходного слоев). При решении обратной задачи минимизировался функционал невязки значений экспериментальных и теоретических поляризационных углов. Оказалось, что функционал невязки принимает минимальное значение при решении обратной задачи для однослойной модели пленки. Поверхностный и переходный слои не обнаруживаются. Возможно, они имеют малую толщину, а их параметры не оказывают существенного влияния на измеряемые эллипсометрические параметры. Это говорит о хорошем качестве границ между пленками и пленкой и подложкой. На рис. 2 представлены рассчитанные дисперсионзависимости показателей преломления и поглощения пленки ные PEDOT: PSS. При этом рассчитанная толщина пленки составила 90 нм. Полученная дисперсия оптических параметров (n, k) пленки PEDOT:PSS хорошо согласуется с известными литературными данными [1, 2].



Рис. 2. Рассчитанные зависимости $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ пленки PEDOT:PSS

Далее было получено решение обратной задачи спектральной эллипсометрии для системы перовскит – PEDOT:PSS – стеклянная подложка. Обратная задача решалась для двух- и трехслойной моделей. В последнем случае электродинамическая модель допускает наличие поверхностного слоя на перовскитной пленке. При решении обратной задачи рассчитывались параметры слоя, моделирующего пленку, и поверхностного слоя. При этом задавались параметры подложки и слоя, моделирующего пленку PEDOT:PSS, которые были определены ранее. Это уменьшает число неизвестных параметров при численном решении обратных оптических задач, а значит увеличивается устойчивость решения этих задач. В этом случае функционал невязки принял минимальное значение при решении обратной задачи для трехслойной модели. На поверхности пленки перовскита находится небольшой поверхностный слой толщиной 10 нм, содержащий 70 % перовскита и 30 % воздуха (пустоты). На рис. 3 представлены рассчитанные дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения перовскитной пленки. Рассчитанная толщина пленки перовскита составила 250 нм.



Рис. 3. Рассчитанные зависимости $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ пленки перовскита

Рассчитанная дисперсия оптических характеристик (n, k) нашей перовскитной пленки отличается от известных литературных данных [3, 4] большим поглощением в области спектра для λ >650 нм. Это указывает на необходимость поиска иных режимов формирования пленок перовскитов, чтобы убрать поглощение, не связанное с возбуждением электронно-дырочных пар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dennler, G.** Angle dependence of external and internal quantum efficiencies in bulk-heterojunction organic solar cells / G. Dennler // J. Appl. Pys. $-2007. - N_{\odot}$ 102. -054516.

2. Optical Properties of Organometal Halide Perovskite Thin Films and General Device Structure Design Rules for Perovskite Single and Tandem Solar Cells / Chang-Wen Chen [et al] // Electronic Supplementary Material (ESI) for Journal of Materials Chemistry A. This journal is © The Royal Society of Chemistry – 2014.

3. Complex Refractive Index Spectra of $CH_3NH_3PbI_3$ Perovskite Thin Films Determined by Spectroscopic Ellipsometry and Spectrophotometry / P. Löper [et al] // J. Phys. Chem. Lett. – 2014. – No 6. – P. 66.

4. Leguy, A. The reversible hydration of $CH_3NH_3PbI_3$ in films, single crystals and solar cells / A. Leguy [et al] // Chem. Mater. – 2015. – No 27 (9). – P. 3397–3407.

УДК 535.338

ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВЕТО- И ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ И ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ВОДЕ

Д. М. КАБАНОВ, <u>Р. Ю. МИКУЛИЧ</u>, Д. В. ШАБРОВ

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Минск, Беларусь

UDC 535.338

OPTICAL PARAMETERS OF LIGHT-EMITTING DIODES AND LASER DIODES FOR DETECTING OF OIL PRODUCTS AND GREENHOUSE GASES IN WATER D. M. KABANAU, <u>R. Y. MIKULICH</u>, D. V. SHABROV

Аннотация

Наиболее предпочтительной областью детектирования нефтепродуктов в воде является средний инфракрасный диапазон спектра, а именно 1,5–2,4 мкм. В данном диапазоне присутствуют характерные, интенсивные полосы поглощения как нефти и нефтепродуктов, так и воды. Установлено, что для детектирования нефти и нефтепродуктов необходимо использовать источники излучения с максимумом спектра излучения в диапазоне 1,68–1,79 мкм. Для детектирования воды источник излучения в диапазоне 1,68–1,79 мкм. Для детектирования воды источник излучения должен иметь максимум спектра излучения в диапазоне 1,85–2,0 мкм. При этом данные продукты имеют окно прозрачности в диапазоне 1,5–1,6 мкм.

Установлено, что для детектирования парниковых газов предпочтителен средний инфракрасный диапазон спектра, так как в данном диапазоне наименьшее количество линий поглощения примесей воздуха. Для детектирования таких компонентов атмосферы, как водяные пары и метан, можно использовать диапазон от 1 до 4 мкм, где присутствуют характерные полосы поглощения воды с максимумами на 1,9 и 2,7 мкм и метана с максимумом на 3,3 мкм. Также в данном диапазоне присутствуют менее интенсивные линии поглощения углекислого газа (2,7 мкм) и закиси азота (2,9 и 3,9 мкм).

Ключевые слова:

оптический абсорбционный метод, инфракрасная спектроскопия, лазерные диоды с GaInAsSb активной областью.

Abstract

The most preferable area of detecting of oil products in water is the mean infrared range of a range, namely 1,5-2,4 microns. At this range there is reference, intensive absorption bands both oil and oil products, and water. It is established that for detecting of oil and oil products it is necessary to use sources of radiation with a radiation spectrum maximum in the range of 1,68-1,79 microns. For water detecting the source of radiation has to have a radiation spectrum maximum in the range of 1,85-2,0 microns. At the same time these products have a spectral window in the range of 1,5-1,6 microns.

It is established that average is preferable to detecting of greenhouse gases infrared the range range as in this range the least number of lines of absorption of impurity of air. For detecting of such components of the atmosphere as steams and methane, it is possible to use the range from 1 to 4 micron where there are reference absorption bands of water with maxima on 1,9 and 2,7 microns and a methane with a maximum on 3,3 microns. Also at this range there are less intensive lines of absorption of a carbon dioxide (2,7 microns) and nitrous oxides (2,9 and 3,9 microns).

Key words:

method of optical absorption, infrared spectroscopy, laser diodes with GaInAsSb the fissile area.

Оптические приборы детектирования на основе лазерных диодов могут быть использованы для решения задач экологического и технологического мониторинга. Повышение содержания парниковых газов в биосфере способно вызвать глобальные геофизические и геохимические изменения: изменение климата, закисление природных вод, загрязнение мирового океана и нарушение в нем баланса углекислоты, разрушение озонового слоя. С целью обнаружения изменения содержания парниковых газов в окружающей среде и проводят исследования состава атмосферного воздуха, воды и почв.

К методам, позволяющим разработать энергоэффективные приборы экологического и технологического мониторинга с малыми габаритами, высокой точностью, селективностью детектируемых газов относится оптический абсорбционный метод. Для определения содержания нефти и нефтепродуктов, а также парниковых газов в воде и в воздухе целесообразно использовать метод селективного оптического поглощения излучения детектируемыми средами в инфракрасной области спектра, используя в качестве источника излучения светодиоды и лазерные диоды [1, 2].

В результате экспериментального исследования спектров поглощения нефти, нефтепродуктов и воды установлен спектральный диапазон детектирования данных продуктов. Наиболее предпочтительной областью детектирования нефтепродуктов в воде является средний инфракрасный диапазон спектра, а именно 1,5–2,4 мкм. В данном диапазоне присутствуют характерные, интенсивные полосы поглощения как нефти и нефтепродуктов, так и воды. На рис. 1 и 2 представлены экспериментально полученные характерные спектры поглощения нефтепродуктов, нефти и воды.

Установлено, что для детектирования нефти и нефтепродуктов необходимо использовать источники излучения с максимумом спектра излучения в диапазоне 1,68–1,79 мкм. Для детектирования воды источник излучения должен иметь максимум спектра излучения в диапазоне 1,85–2,0 мкм. При этом данные продукты имеют окно прозрачности в диапазоне 1,5–1,6 мкм.





Рис. 2. Сравнение спектров поглощения нефти и воды

Установлено, что для детектирования целого ряда парниковых газов предпочтителен средний инфракрасный диапазоне спектра, так как большинство характерных линий поглощения располагаются отдельно без сильного перекрытия (см. рис. 3, 4). Для детектирования таких компонентов атмосферы, как водяные пары и метан, можно использовать диапазон от 1 до 4 мкм, где присутствуют характерные полосы поглощения воды с максимумами на 1,9 и 2,7 мкм и метана с максимумом на 3,3 мкм. Также в данном диапазоне присутствуют менее интенсивные линии поглощения углекислого газа (2,7 мкм) и закиси азота (2,9 и 3,9 мкм) [3].



Рис. 3. Спектры поглощения основных парниковых газов в диапазоне от 1 до 4 мкм

Для детектирования таких парниковых газов, как углекислый и угарный газы, а также закиси азота предпочтительней использовать диапазон от 4 до 5 мкм (рис. 4.) В данном диапазоне присутствуют характерные полосы поглощения: CO₂ (4,2–4,3 мкм); CO (4,6–4,7 мкм); N₂O (4,4–4,6 мкм) [3].



Рис. 4. Спектры поглощения основных парниковых газов в диапазоне от 4 до 5 мкм

Сопоставление спектров излучения полупроводниковых лазеров с GaInAsSb активной областью и дисковым резонатором с характерными спектрами поглощения метана и закиси азота представлены на рис. 5.



Рис. 5. Спектры поглощения метана и закиси азота, а также спектр излучения дискового лазера с GaInAsSb активной областью. Фиолетовым обозначен спектр метана (CH₄), зеленым – спектр закиси азота (N₂O)

Спектр излучения лазера получен в импульсном режиме на частоте следования импульсов $f = 10 \text{ к}\Gamma \text{ц}$, с длительностью импульса 2,7 мкс. Ток инжекции составлял 250 мА.

Также для детектирования больших концентраций нефти и нефтепродуктов в воде можно использовать светодиоды малой мощности (до 4 мВт в импульсном режиме [4]). Спектры излучения светодиода с GaInAsSb активной областью для детектирования нефти и нефтепродуктов в воде представлены на рис. 6.

В ходе экспериментального исследования спектров поглощения нефти и нефтепродуктов, а также спектров поглощения основных компонентов парникового газа, установлено что в области среднего ИК диапазона спектра присутствуют отдельно стоящие характерные полосы поглощения таких элементов, как: нефть и нефтепродукты – 1,75 мкм, метан – 2,4 мкм, закись азота – 2,3 мкм. Установлено, что для детектирования данных элементов в воде и атмосфере можно использовать лазерные диоды и светодиоды с GaInAsSb активной областью, имеющие спектры излучения в диа-
пазоне от 1,6 до 2,4 мкм в зависимости от мольного состава активной области.



Рис. 6. Зависимость спектра излучения светодиодов с GaInAsSb активной областью от подаваемого тока

Использование новых полупроводниковых источников излучения среднего ИК диапазона спектра позволит создать высокоточные, энергоэффективные, быстродействующие и компактные приборы экологического и технологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Портативный оптический анализатор содержания воды в нефти на основе оптопары «светодиодная матрица – широкополосный фотодиод» среднего ИК диапазона (1,6–2,4 мкм) / К. В. Калинина [и др.]. – 2010. – С. 1–6.

2. Измеритель содержания воды в нефти и нефтепродуктах на основе инфракрасных оптоэлектронных пар светодиод – фотодиод / М. В. Богданович [и др.]. – 2017 – Т. 17. – С. 20–23.

3. The HITRAN Database / Rothman L.S. –2015. – Modeofaccess: http://hitran.org– Dateofaccess: 30.03.17

4. <u>http://www.ibsg.ru/led/led_1.html</u>

E-mail: <u>d.shabrov@ifanbel.bas-net.by</u>

УДК 620.179.14 СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОАКУСТИЧЕКОЙ ЭМИССИИ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

В. Н. КОСТИН, Е. Д. СЕРБИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО

ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН» Екатеринбург, Россия

UDS 620.179.14 STRUCTURALLY SENSITIVE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF MAGNETOACOUSTIC EMISSION IN FERROMAGNETS V. N. KOSTIN, E. D. SERBIN, O. N. VASILENKO

Аннотация

Исследованы характеристики магнитоакустической эмиссии (МАЭ) большой группы различающихся по физическим свойствам и размерам образцов металлических ферромагнетиков. Исследована структурная чувствительность таких параметров магнитоакустической эмиссии, как амплитуда и основная частота. Показано, что основная частота магнитоакустической эмиссии отожженных сталей меняется слабо и немонотонно, что делает проблематичным ее применение для контроля качества отжига. Зависимость амплитуды магнитоакустической эмиссии от частоты перемагничивающего поля имеет сходный немонотонный характер для большой группы различных по физико-химическим свойствам ферромагнетиков, при этом максимум амплитуды соответствует частоте поля 3– 5 Гц. Установлено, что амплитудные и частотные параметры магнитоакустической эмиссии исследованных сталей коррелируют с их остаточной магнитной индукцией. Полученные результаты могут быть полезны при разработке магнитных и магнитоакустических методов контроля и диагностики.

Ключевые слова:

магнитоакустическая эмиссия, магнитострикционная чувствительность, амплитуда, основная частота, частота перемагничивания, термическая обработка.

Abstract

The characteristics of magnetoacoustic emission (MAE) of a large group of metallic ferromagnets differing in the physical properties and dimensions of the samples were studied. The structural sensitivity of such parameters of magnetoacoustic emission as amplitude and fundamental frequency were studied. It is shown that the main frequency of magnetoacoustic emission of annealed steels varies weakly and nonmonotonely, which makes its application problematic for annealing quality testing. The dependence of the amplitude of magnetoacoustic emission on the frequency of the remagnetizing field has a similar nonmonotonic character for a large group of ferromagnets different in their physical and chemical properties, while a maximum of amplitude corresponding to a field frequency of 3-5 Hz. It is established that the amplitude and frequency parameters of the magnetoacoustic emission of the investigated steels correlate with their residual magnetic induction. The obtained results can be useful in the development of magnetic and magnetoacoustic methods of testing and diagnostics.

Key words:

magnetoacoustic emission, magnetostrictive sensitivity, amplitude, fundamental frequency, remagnetizing frequency, heat treatment.

Магнитоакустическая эмиссия представляет собой всю совокупность упругих колебаний, возникающих в ферромагнетике при его перемагничивании. Существует три основных механизма возникновения магнитоакустической эмиссии: магнитострикционный механизм, электро-магнитоакустическое преобразование (ЭМАП), упругие колебания, возникающие при необратимом смещении доменных границ (шум Баркгаузена). Механизм ЭМАП не проявляется при низких (единицы Гц) частотах перемагничивания из-за малости вихревых токов. Магнитоакустическая эмиссия несет информацию как о локальных магнитострикционных взаимодействиях, связанных с необратимыми смещениями 90-градусных доменных границ, так и о результирующем магнитострикционном изменении размеров ферромагнетика [1]. Сущность явления магнитоакустической эмиссии также описана в предыдущих работах авторов [2, 3].

Если рассматривать динамические процессы перестройки доменной структуры при перемагничивании ферромагнетика, то можно выделить различные размерные (например, площадь или длина пробега доменной границы), количественные (например, число одновременно смещающихся границ) и временные (время скачка Баркгаузена) характеристики, которые, естественно, будут проявляться на различных участках спектра упругих колебаний. Результирующий сигнал магнитоакустической эмиссии также зависит от переотражения упругих колебаний от границ ферромагнетика, т. е. параметры магнитоакустической эмиссии зависят от формы и размеров перемагничиваемого объекта [1, 2].

Все вышеуказанные особенности находят отражение в спектре магнитоакустической эмиссии. В предыдущей статье авторов [1] показано, что амплитуда гармоники с частотой, равной удвоенной частоте перемагничивания, пропорциональна линейной магнитострикционной чувствительности сплавов Fe-C, и что амплитуда данной гармоники пропорциональна протяженности ферромагнитного образца вдоль направления приложенного поля. В той же статье показано, что структурно-чувствительными параметрами магнитоакустической эмиссии могут быть основная частота и усредненная амплитуда сигнала магнитоакустической эмиссии.

Таким образом, задачей настоящей работы было исследование характеристик магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных сталях с различными структурой и магнитострикционными свойствами с помощью широкополосных датчиков акустической эмиссии с целью выявления перспективных структурно-чувствительных параметров контроля материалов. На образцах из трех марок сталей (сталь 10, 65Г и 95Х18) было проведено исследование влияния условий возбуждения на параметры магнитоакустической эмиссии в ферромагнетиках, различающихся по структурнофазовому составу и, соответственно, по магнитным свойствам. Из данных сталей были изготовлены пластины размером 4,6 × 40,1 × 90 мм, которые затем были подвергнуты закалке и отпуску при различных температурах ($T_{3ак}$ и $T_{отп}$ соответственно). Характеристики пластин приведены в табл. 1.

Материал	Обработка		Магнитные свойства				
	$T_{_{3a\kappa}}$, ⁰ C	T_{omn} , ⁰ C	<i>B</i> _{<i>r</i>} , T	H_c , А/см	μ_{max}	$B_{ m max}$, T	
Сталь 10	930	400	1,08	8,89	531	2,12	
Сталь 10	930	500	1,3	7,86	697	2,12	
Сталь 10	930	600	1,52	5,95	942	2,11	
65Г	870	200	0,925	32,3	153	1,68	
65Г	870	400	1,45	14,4	556	2,05	
65Г	870	600	1,55	13,6	563	2,00	
95X18	1070	200	0,525	74,5	37,0	1,01	
95X18	1070	550	0,826	27,8	165	1,46	

Табл. 1. Характеристики термообработанных стальных пластин

Для исследования влияния формы и геометрических размеров ферромагнетиков на величину и характер магнитоакустической эмиссии из отожженного пермендюра (50 % Fe, 50 % Co) были изготовлены три образца: короткая прямоугольная пластина 4,1 × 40 × 89 мм (образец П1); длинная пластина размерами 2 × 8,9 × 295 мм (образец П2) и укороченная пластина размерами 2 × 9 × 161 мм (образец П3).

Для оценки влияния напряженно-деформированного состояния на сигнал МАЭ были выбраны образцы из сталей 20Г и 70Г, напряженнодеформированное состояние которых было проварьировано в широких пределах посредством холодной пластической деформации прокаткой до, соответственно, 40 и 63 % (по изменению сечения) и затем отжига при различных температурах в диапазоне от 20 до 800 °C в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе. Затем образцы шлифовали для снятия окалины и обезуглероженного слоя. Конечные размеры образцов стали 20Г составили 4 x 10,2 x 69 мм, а стали 70Г – 6 x 9,5 x 88 мм.

Магнитные свойства вещества образцов были определены с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500 производства фирмы Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Германия. Погрешность измерения намагниченности не превышала 2 %, погрешность измерения поля – 1 %.

Перемагничивание исследуемых образцов проводилось в соленоиде на частотах 0,1–15 Гц синусоидальным током. Синусоидальный сигнал

вырабатывался прецизионным низкочастотным генератором Г3-110, усиливался специально разработанным усилителем мощности и подавался в соленоид. Максимальная амплитуда перемагничивающего поля составляла 160 А/см. Для уменьшения влияния пондеромоторных сил в соленоиде образцы размещались на демпфирующей подкладке. Акустические колебания регистрировались широкополосными датчиками акустической эмиссии LD-11 и А-9 ЭЛТЕСТ. Более полное описание установки для возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии можно найти в работах [2, 3].

На указанной установке были произведены магнитоакустические измерения с целью установления характера зависимости амплитуды МАЭ от частоты перемагничивания () группы образцов с различным структурно-фазовым состоянием (см. табл. 1). Как видно из рис. 1, для всех образцов из сталей 10 и 95Х18 характерно наличие максимума на зависимости амплитуды МАЭ от частоты переменного поля. При уменьшении частоты поля ниже 0,5 Гц сигнал резко уменьшается до уровня шума. При увеличении частоты сигнал достаточно быстро уменьшается и при частоте 15 Гц и более также становится соизмерим с шумовым уровнем. Не монотонность зависимости амплитуды МАЭ от частоты переменного поля и "резонансная" частота МАЭ, приходящаяся на частоты 3–4 Гц, наблюдаются для всех образцов группы, несмотря на различия их физических свойств.



Рис. 1. Зависимость амплитуды МАЭ закаленных и отпущенных при различных температурах образцов из (а) стали 10 и (б) стали 95Х18 от частоты поля f_{rm} . Температуры отпуска отдельных образцов указаны в поле рисунка

В работе [1] в качестве одного из возможных структурно чувствительных параметров была предложена основная частота магнитоакустической эмиссии (т. е. частота гармоники с максимальной амплитудой и мощностью). Зависимость усредненных по пяти измерениям значений основной частоты МАЭ сигнала от температуры отжига стали 70Г представлена на рис. 2. Как видно из рис., его величина меняется не более, чем на 12 %, что делает проблематичным применение МАЭ для контроля исследованных материалов. Ранее установлено [1], что основная частота может быть новым параметром контроля средне- и высокотемпературного отпуска сталей различного химического состава [4].



Рис. 2. Зависимость основной частоты МАЭ сигнала от температуры отжига стали 70Г (частота перемагничивания $f_{rm} = 4$ Гц)

Для отожженных сталей 20Г и 70Г более перспективными являются амплитудные параметры магнитоакустической эмиссии. На рис. 3 показаны зависимости амплитуды МАЭ и остаточной магнитной индукции от температуры отжига образцов из холоднодеформированных и отожженных сталей 20Г и 70Г. На рис. 3 наблюдается явная корреляция между остаточной магнитной индукцией и амплитудой МАЭ. При увеличении температуры отжига в диапазоне (20 ÷ 700) ⁰С величина U_{MAE} сталей 20Г и 70Г возрастает приблизительно в 2 раза, что сопоставимо с изменением остаточной магнитной индукции этих материалов.



Рис. 3. Зависимости амплитуды МАЭ и остаточной магнитной индукции от температуры отжига образцов из холоднодеформированных и отожженных сталей 20Γ (а) и 70Γ (б)

Также планируется проведение исследования зависимости магнитоакустических характеристик образцов стали 30, подвергнутой пластической деформации прокаткой в валках и последующему плоскому прессованию, от эволюции структуры и уровня напряжений.

Были проведены измерения магнитных параметров стали 30. На рис. 4, а показана зависимость коэрцитивной силы от степени деформации стали. Видно, что коэрцитивная сила имеет максимум при деформации порядка 6 % и монотонно падает при увеличении деформации до 20 %. Остаточная магнитная индукция (рис. 4, б) напротив, увеличивается при увеличении деформации от 6 %. Такое поведение коэрцитивной силы может быть связано с релаксацией напряжений первого рода в результате прессования.



Рис. 4. Зависимости коэрцитивной силы (а) и остаточной магнитной индукции (б) от степени деформации стали 30

В результате выполнения данной работы установлено, что зависимость амплитуды магнитоакустической эмиссии от частоты перемагничивающего поля имеет немонотонный характер. Для большой группы различных по физическим свойствам и размерам образцов металлических ферромагнетиков частота поля, соответствующая максимальной амплитуде МАЭ, составляет 3–5 Гц.

Исследована структурная чувствительность таких параметров магнитоакустической эмиссии, как основная частота и поле максимума МАЭ. Основная частота магнитоакустической эмиссии слабо меняется при увеличении температуры отжига исследованных сталей 20Г и 70Г, что делает проблематичным ее использование в качестве параметра контроля. Показано, что оптимальным параметром контроля отожженных сталей являются амплитуда МАЭ.

Показано, что амплитуда магнитоакустической эмиссии отпущенных сталей 20Г и 70Г коррелирует с их остаточной магнитной индукцией.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке магнитных и магнитоакустических методов контроля и диагностики.

Работа выполнена по теме «Диагностика» № 01201463329.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Amplitude-frequency characteristics of magnetoacoustic emission in heattreated Fe alloys / V. N. Kostin [et. al.] // Physical mesomechanics. $-2013. - V. 16. - N_{\text{O}} 5. - P. 103-110.$

2 Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах / В. Н. Костин [и др.] // Акустический журнал. – 2017. – № 2. – С. 209–216.

3 Магнитоакустический контроль твердости холоднодеформированных и термообработанных углеродистых сталей / В. Н. Костин [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 2. – С. 41–46.

4 Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженнодеформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 10. – С. 33–41.

УДК 620.178

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ НА РЕАКЦИЮ КОМПОЗИЦИОННОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ УДАРНОМ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИИ

А. П. КРЕНЬ, *И. Ю. КИНЖАГУЛОВ, Т. А. ПРОТАСЕНЯ, *А. В. ФЕДОРОВ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» *ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» Минск, Беларусь; Санкт-Петербург, Россия

UDC 620.178

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF UNDERSURFACE DEFECTS ON THE RESPONSE OF THE COMPOSITE CARBON MATERIAL DURING IMPACT MICROINDENENTATION *A. P. KREN, I. Y. KINZHAGULOV, T. A. PRATASENIA, A. V. FEDOROV*

Аннотация

В статье приводятся сведения о возможности обнаружения дефектов типа «расслоение» на основании контроля твердости индентирования определяемой согласно СТБ 2495–2017.

Ключевые слова:

индентирование, композиты, дефект, твердость.

Abstract

The paper provides information on the possibility of detecting defects of the "delamination" type on the basis of control of the indentation hardness determined in accordance with STB 2495–2017.

Key words:

indentation, composites, defect, hardness.

В настоящее время углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) и углепластики находят широкое применение в различных отраслях промышленности и особенно при создании космической и авиационной техники. Они используются для изготовления обтекателей, сопел двигателей и других изделий, подвергающихся интенсивному тепловому воздействию. Одним из наиболее опасных дефектов для таких материалов является расслоение, которое может привести к катастрофическим последствиям. Кроме того, для рассматриваемых материалов важным является сохранение их физико-механических характеристик на протяжении всей стадии активной эксплуатации. В настоящей работе исследовалась возможность применения метода динамического индентирования для поиска подповерхностных дефектов в виде пустот или расслоений. Данный метод уже успешно используется для контроля физико-механических свойств [1–3]. С целью его применения был разработан стандарт СТБ 2495–2017 «Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования».

Для экспериментальной проверки возможностей метода и адаптации оборудования к особенностям контроля композиционных материалов был изготовлен прибор (рис. 1), позволяющий осуществить точное позиционирование ударного преобразователя и провести измерение в заданной точке контролируемого образца.



Рис. 1. Внешний вид прибора: 1 – датчик; 2 – электронный блок; 3 – планшетный компьютер; 4 – объект контроля (образец из УУКМ)

Объектом контроля являлся образец из УУКМ на основе ткани УТ– 900, прошедший термоградиентное уплотнение пиролитическим углеродом. Образец имел толщину ~10 мм. Дефект вида «расслоение» моделировался путем закладки пластин из слюды размерами 50х50 мм до операции карбонизации. Схема закладки дефектов в образцах показана на рис. 2.

Контролируемым параметром являлась твердость индентирования H_{it} поверхностных слоев образцов УУКМ. Индентор был выполнен из карбида вольфрама с радиусом закругления 0,5 мм, массой 5 г. Предударная скорость составляла около 0,9 м/с.



Рис. 2. Образец для испытаний: а – схема расположения закладок (дефектов); б – общий вид и увеличенное изображение дефектной области

На рис. 3 приведены характерные диаграммы ударного вдавливания индентора в испытуемый материал в различных областях объекта контроля, которые отражают различия свойств контролируемых участков. Расчет *H*_{*it*} на основе полученных диаграмм показывает существенное различие ее значений для бездефектной области и области над искусственными дефектами.



Рис. 3. Диаграммы «контактное усилие – глубина внедрения» (Р-а)

При проведении эксперимента контроль проводился в режиме последовательного сканирования по поверхности с шагом 5–10 мм. Полученные результаты представлены в виде диаграммы на рис. 4, представляющей собой распределение значений твердости индентирования в зависимости от координат контролируемых точек на поверхности объекта контроля. Важно отметить, что значения твердости индентирования, полученные во всех областях над искусственными дефектами, примерно, одинаковые ($H_{it} = 180-190$ ед.), несмотря на то, что глубина закладки дефектов различна. Это свидетельствует о том, что твердость индентирования H_{it} в этих областях не связана с наличием дефектов (по крайней мере на глубине залегания дефектов более 2–3 мм), а определяется отличиями в структуре (отсутствием прошивки) и, следовательно, свойств материала образцов.



Рис. 4. Диаграмма распределения твёрдости по поверхности образца из УУКМ

Таким образом, в ходе эксперимента была обоснована возможность применения метода динамического индентирования для контроля однородности распределения механических свойств поверхностных слоев образцов из УУКМ.

Показано, что нарушения в структуре армирующих слоев (например, отсутствие прошивки каркаса) закономерно приводит к изменению физико-механических характеристик материала в этих участках по сравнению с бездефектными областями, о чем свидетельствуют различия значений твердости индентирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудницкий, В. А. Соотношение динамической и статической твердости металлов / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Вести НАН Беларуси. – 2016. – № 4. – С. 16–22.

2. Степанов, Г. В. Сопротивление металлов динамическому внедрению индентора / Г. В. Степанов, Э. Г. Сафаров // Проблемы прочности. – 1986. – № 5. – С. 80–83.

3. Рудницкий, В. А. Определение физико-механических характеристик металлов на основе анализа особенностей их динамического локального деформирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 2016. – № 4. – С. 61–67.

E-mail: alekspk@mail.ru

УДК 620.178 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. П. КРЕНЬ, О. В. МАЦУЛЕВИЧ, *К. А. СТЕПАНОВА, *И.Ю.КИНЖАГУЛОВ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» *ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» Минск, Беларусь; Санкт-Петербург, Россия

UDC 620.178

APPLICATION OF THE DYNAMIC INDENTATION METHOD FOR THE TESTING OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS

A. P. KREN, O. V. MATSULEVICH, I. Y. KINZHAGULOV, K. A. STEPANOVA

Аннотация

В статье приводятся сведения о приборе, реализующем метод динамического индентирования, для контроля механических свойств композиционных материалов. Приведены сведения о результатах экспериментальной проверки работы прибора на реальных материалах и изделиях.

Ключевые слова:

индентирование, композиты, модуль упругости, твердость.

Abstract

The paper contains information about the device that realizes the method of dynamic indentation, for the testing of the mechanical properties of composite materials. Information on the results of experimental verification of the operation of the instrument on real materials and products is given.

Key words:

indentation, composites, modulus of elasticity, hardness.

В настоящее время композиционные материалы (КМ) находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности и особенно в авиационной и ракетно-космической. КМ, армированные высокопрочными волокнами, позволяют обеспечивать более высокие механические характеристики. Однако такие КМ обладают сложной гетерогенной структурой, наличием нескольких направлений армирования, разными свойствами матрицы и волокна, большим количеством границ их раздела, что существенно затрудняет оценку их механических характеристик неразрушающими методами контроля. Одним из перспективных направлений развития неразрушающих методов безобразцовой оперативной оценки механических характеристик является применение метода динамического индентирования (ДИ) [1, 2]. В основе метода лежит непрерывная регистрация процесса ударного локального взаимодействия индентора с испытываемым материалом. Регистрируемые данные представляются в виде диаграммы «контактное усилие – глубина внедрения», являющейся аналогом диаграммы «напряжение—деформация».

Получаемая диаграмма F(h) состоит из кривых нагружения (*a*) и разгрузки (*б*) (рис. 1) и характеризует упругопластические свойства исследуемого объекта. При этом кривая разгрузки определяется преимущественно упругим восстановлением отпечатка индентора. Контроль механических характеристик на этапах изготовления КМ и изделий из них, как правило, необходимо осуществлять на уровне компонентов материала. А в ходе эксплуатации КМ в производственных условиях необходимо контролировать механические характеристики уже на макроуровне для определения интегральных свойств КМ и изделий из них.



Рис. 1. Диаграмма «контактное усилие – глубина внедрения»: а – кривые нагружения; б – разгрузки

Необходимость контроля механических характеристик на микро- и макроуровне накладывает определенные требования при использовании метода ДИ. В этой связи для контроля механических характеристик КМ методом ДИ был разработан прибор (рис. 2) с комплектом специальных датчиков, обеспечивающий оценку механических характеристик на различных структурных уровнях.



Рис. 2. Прибор ДИ с комплектом специальных датчиков

Контроль механических характеристик компонентов КМ на микроуровне осложнен их геометрическими размерами (не превышают 0,5 мм), что потребовало разработки датчика № 1, включающего средства визуализации и прецизионного позиционирования. Для обработки измерительной информации и отображения данных о позиционировании датчика относительно объекта контроля было разработано программное обеспечение для проведения измерений в заданной локальной точке образца КМ (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид окна программного обеспечения, применяемого в приборе

Для обеспечения контроля механических свойств КМ и изделий из них на макроуровне были разработаны датчики №2 и №3, позволяющие осуществлять оценку механических характеристик с площадью контроля

2 и 4 мм² соответственно. Площадь контактного взаимодействия (рис. 4, а) инденторов датчиков №2 и №3 с поверхностью материала контролируемого объекта захватывает различные компоненты КМ, что позволяет получать информацию об интегральных механических свойствах КМ. Радиус инденторов датчиков выбирался исходя из геометрических характеристик компонент КМ.

Объектом контроля (ОК) являлись дефектные и бездефектные образцы заготовок из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ). Внешний вид объектов контроля представлен на рис. 4, б. В ходе испытаний определялись твердость и модуль упругости углеродных стержней в продольном и поперечном направлениях, а также их связующего (пека).



Рис. 4. Зоны отпечатков, оставленные от шаровых инденторов, разных диаметров и внешний вид объекта контроля: S₁, S₂ и S₃ – площади отпечатков, оставляемых инденторами датчиков №1, №2 и №3 соответственно

По результатам обработки диаграмм вдавливания были вычислены твердость H, модуль упругости E, средние значения твердости \overline{H} и модуля упругости \overline{E} , коэффициенты вариации твердости $V_{\rm H}$ и модуля упругости $V_{\rm E}$ по результатам трех измерений для каждой области контроля.

Анализ результатов измерений механических характеристик компонент УУКМ образцов показал существенное различие для торца стержня, боковой поверхности стержня и связующего, что обусловлено структурной неоднородностью порами и микротрещинами (на микроуровне). Средние значения модуля упругости составили: для торца стержня – 27 ГПа, для боковой поверхности – 11,6 ГПа, для пека – 7,5 ГПа. Для твердости – 0,34, 0,47 и 0,33 ГПа соответственно.

В ходе исследований интегральных свойств УУКМ, было выявлено, что наличие неоднородностей в объекте контроля на макроуровне (расслоения, макротрещины и зоны локальной неоднородности структуры) отражаются на результатах измерений модуля упругости. Так, при исследовании дефектного образца с поведенным каркасом среднее значение модуля упругости – 19,0 ГПа, рассчитанное по всему объему образца, соответствует среднему значению модуля упругости образца, выполненного без нарушения технологии изготовления – 19,2 ГПа. Однако однородность распределения механических характеристик по площади образца ниже ($V_E = 0,98$ и 4,25 % соответственно). Это свидетельствует о наличие зон локальной неоднородности структуры размерами, сопоставимыми с площадью контактного взаимодействия инденторов датчиков №2 и №3 с материалом объекта контроля.

При исследовании образца с внутренними трещинами среднее значение модуля упругости (17,1 ГПа), рассчитанное по данным контроля на широкой площади поверхности, было меньше значения модуля упругости образца, выполненного без нарушения технологии изготовления (19,2 ГПа).

Таким образом, метод динамического индентирования позволяет определить механические характеристики компонент, образующих армированный композиционный материал, т. е. осуществлять контроль на микроструктурном уровне, а также оценивать интегральные механические свойства на макроуровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рудницкий, В. А.** Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов / В. А. Рудницкий, А. В. Рабцевич // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79–86.

2. Vriend, N. M. Determination of the viscoelastic properties of elastomeric materials by the dynamic indentation method / N. M. Vriend, A. P. Kren // Polymer Testing. -2004. -Vol. 23. $-N_{2}$ 4. -P. 369–375.

E-mail: alekspk@mail.ru

УДК 620.179.14 МАГНИТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

А. П. НИЧИПУРУК, М. С. ОГНЕВА, А. Н. СТАШКОВ

ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН» Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14 MAGNETIC METHOD OF ESTIMATION OF RESIDUAL STRESSES IN LOW-CARBON STEEL PRODUCTS *A. P. NICHIPURUK, M. S. OGNEVA, A. N. STASHKOV*

Аннотация

Рассмотрены результаты реализации магнитной методики, основанной на использовании двух взаимно перпендикулярных магнитных полей, за счет чего становится возможным разделить вклады в процессы перемагничивания смещения 90- и 180-градусных доменных границ. Показано, что предложенная экспериментальная методика позволяет определить величину критических полей смещения 90-градусных доменных границ, что, в свою очередь, делает возможным оценить уровень остаточных напряжений в деформированном металле.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, остаточное напряжение, деформация, поле магнитной анизотропии, циркулярное магнитное поле, намагниченность.

Abstract

The results of the realization of a magnetic technique based on using of two mutually perpendicular magnetic fields are presents. The technique allows to divide the contributions of 90- and 180-degree domain walls motions to the processes of magnetization. It is shown that the experimental method allows to determine the critical field of displacement of the 90-degree domain walls, which in turn makes it possible to estimate the level of residual stresses in a deformed metal.

Key words:

nondestructive testing, residual stresses, strain, field of magnetic anisotropy, circular magnetic field, magnetization.

Многолетний опыт эксплуатации металлического оборудования и конструкций, а также результаты многочисленных экспериментов показывают, что остаточные напряжения (OH) существенно влияют на надежность и долговечность техники [1]. ОН существенно влияют на статическую и динамическую прочность, а также коррозионную стойкость изделий. В начальный период эксплуатации машин и механизмов, изготовленных из деталей и узлов, имеющих ОН, в результате взаимодействия эксплуатационных нагрузок и остаточных напряжений изменяются размеры деталей, и в результате снижается точность, что приводит к повышенному износу, нарушению нормальной работы и разрушению машин и механизмов. Существующие методы измерения ОН можно разделить на 2 группы: разрушающие и неразрушающие. Разрушающие («механические») методы основаны на принципе измерения деформации, вызванной удалением части объёма напряжённого объекта. Недостатком этих методов является их разрушающий характер. Кроме того, некоторые способы отделения слоя вызывают добавочное ОН, которое снижает первоначальное напряжение [2]. К неразрушающей группе методов контроля ОН относятся ультразвуковые, магнитные. Магнитные методы являются перспективными ввиду их простоты реализации и довольно высокой чувствительности к изменениям структуры.

Целью данного исследования была разработка методики эксперимента, позволяющего выделить из процесса перемагничивания критические поля смещения 90-градусных доменных границ и поиск параметров, коррелирующих со степенью деформации металла. Методика основана на использовании двух взаимно перпендикулярных магнитных полей, одно из которых постоянно (либо квазипостоянно), а второе переменное и своим изменением вызывает обратимое изменение намагниченности образца, причем таким образом, что с учетом расположения измерительной катушки измеряемый сигнал связан с проекцией намагниченности на направление постоянного поля.

На первом этапе исследования необходимым условием являлось создание однородного подмагничивающего поля. Однородность магнитного поля была достигнута с помощью использования в измерительной схеме соленоида, в котором располагался образец (зона однородности соленоида значительно превышает длину образца). Путем пропускания переменного синусоидального тока определенной частоты через образец в нем возбуждали циркулярное магнитное поле, перпендикулярное полю соленоида. Исследования проводились на образцах в виде проволок из низкоуглеродистой стали Cт1кп, со степенью относительного удлинения от 0 до 25 % [3].

На рис. 1 приведены результаты измерений для исходного образца и трех степеней пластической деформации.



Рис. 1. Зависимость показаний селективного вольтметра от величины подмагничивающего поля в соленоиде (петля гистерезиса) для образцов с относительным удлинением: a - 0 %; 6 - 4 %; B - 10 %; r - 15 %.

В случае недеформированной или слабо деформированной проволоки любые направления осей кристаллитов примерно равновероятны, и получим один широкий пик около $H_0 = 0$ (см. рис.1, а). Однако с ростом степени деформации растут остаточные напряжения и все больше начинают выделяться «легчайшие направления», вдоль которых, в основном, и ориентируются магнитные моменты. В более сильных полях *H*₀ начинаются 90-градусные переходы. В результате моменты всех кристаллитов, чьи легчайшие оси примерно перпендикулярны Н₀, перебрасываются в ближайшие к этому полю ребра их кристаллических ячеек. Это приводит к значительному росту как намагниченности проволоки, так и к резкому возрастанию вращательного момента, действующего со стороны поля Н. Поэтому вблизи значения H₀, равного сумме среднего поля наведенной магнитной анизотропии (*H*_a) и поля задержки 90-градусных переходов (H_{90}) , возникает еще один максимум сигнала. При уменьшении H_0 обратные переходы магнитных моментов в направления «легчайших осей» начинаются только, если наведенная анизотропия достаточно сильна. В этом случае обратные 90-градусные переходы пойдут, когда величина H_0 окажется близка к разности поля наведенной локальной анизотропии и поля задержки сдвигов 90-градусных границ. Это означает, что в сильно деформированных образцах поле правого максимума (рис. 1) всегда больше, чем поле левого максимума. Из полученных зависимостей, определив Н_{прав} и $H_{\text{лев}}$, можно оценить уровень остаточных напряжений σ в деформированной проволоке, воспользовавшись выражением:

$$M_s H_a = 3/2 \cdot \lambda_{100} \cdot \sigma ,$$

где M_s – намагниченность насыщения контролируемого изделия; λ_{100} – константа магнитострикции в направлении (100).

Деформация,%	2	4	10	15	23
<i>H_a</i> , А/см	7	17,5	20	24	20
σ, МПа	38	117	133	165	133

Табл. 1. Значения остаточных сжимающих напряжений в пластически деформированной проволоке

На основе рассмотренных выше данных был сконструирован Побразный первичный преобразователь [4]. Квазистатическое магнитное поле в контролируемом образце создавалось с помощью П-образного сердечника, на который были нанесены намагничивающие обмотки; циркулярное магнитное поле возбуждалось за счет протекания электрического тока через поджимные контакты преобразователя.

Магнитные свойства измеряли на плоских образцах после их разгружения. Первичный преобразователь устанавливали на поверхность образца вдоль направления предварительного растяжения. Результаты измерений приведены на рис. 2.



Рис. 2. Зависимость показаний цифрового синхронного детектора от величины поляризующего поля для образцов с различной степенью относительного удлинения

Вследствие формирования в образцах магнитной текстуры типа «легкая плоскость», в процесс перемагничивания больший вклад начинают вносить 90-градусные переходы, о чем свидетельствует появление двух максимумов (или перегибов) на кривых. Полусумма абсолютных значений $H_{\text{прав}}$ и $H_{\text{лев}}$ равна полю наведенной магнитной анизотропии в образцах после деформационного воздействия. При увеличении степени пластической деформации наблюдается максимум наведенной магнитной анизотропии при относительном удлинении ~ 10 %, что согласуется с полученными данными на проволоках. В табл. 2 приведены результаты оценки остаточных напряжений. Табл. 2. Значения остаточных сжимающих напряжений в пластически деформированных пластинах

Отн. удлинение, %	1,6	4,6	10,2	12
<i>H</i> _a , А/см	10,3	13,4	16,7	14,9
σ, МПа	68,7	89,8	111,9	99,8

В результате проведенных исследований была разработана магнитная методика контроля уровня остаточных механических напряжений в конструкциях из низкоуглеродистых сталей и первичный преобразователь, реализующий данную методику с односторонним доступом к контролируемому объекту. Примененная оригинальная схема намагничивания и получения информации позволила экспериментально определять величину поля наведенной магнитной анизотропии путем разделения вкладов в процессы перемагничивания смещения 90- и 180-градусных доменных границ и дала возможность оценить величину остаточных напряжений в изделиях из малоуглеродистой стали.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Диагностика», № г.р. 01201463329) при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-58-00027 Бел_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишняков, Я. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, В. Д. Пискарев. – М. : Металлургия, 1989. – 254 с.

2. Комяк, Н. И. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений / Н. И. Комяк, Ю. Г. Мясников. – Л. : Машиностроение, 1972. – 87 с.

3. Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволоках из низкоуглеродистой стали / А. П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 10. – С. 18–26.

4. Огнева, М. С. Локальное определение поля наведенной магнитной анизотропии и уровня остаточных механических напряжений в деформированных растяжением объектах из малоугредостых сталей / М. С. Огнева, А. П. Ничипурук, А. Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2016. – № 11. – С. 3–9.

E-mail: nichip@imp.uran.ru

УДК 620.181 ПЕРСПЕКТИВЫ ФЕРРОЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ СЛАБОМАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

В. И. ПУДОВ, Ю. Я. РЕУТОВ, М. Б. РИГМАНТ

ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н Михеева УрО РАН» Екатеринбург, Россия

UDC 620.181

PROSPECTSOFFERRO-ZONEDIAGNOSTICSWEAKSTAINLESSSTEELS OF THE AUUSTENITE CLASSV. I. PUDOV, YU. YA. REUTOV, M. B. RIGMANT

Аннотация

Рассмотрены перспективы применения разных моделей феррозондовой аппаратуры для локальной диагностики ферритной α -фазы в сталях аустенитного класса. Они позволяют измерять с погрешностью не более ±5 % содержание ферромагнитной фазы от 2,0 до 12 % и с погрешностью не более ±7 % при содержании ферромагнитной фазы до 25 % и более.

Ключевые слова:

аустенитная сталь, ферритная фаза, феррозондовая аппаратура.

Abstract

The prospects of using different models of ferro-probe equipment for local diagnostics of the ferrite a-phase in steels of austenitic class are considered. The equipment makes it possible to measure the content of the ferromagnetic phase from 2.0 to 12 % with an error of no more than ± 5 % and with an error of no more than ± 7 % with a ferromagnetic phase content of up to 25 % or more.

Key words:

austenitic steel, ferritic phase, ferro-zone equipment.

В настоящее время производится более 100 марок сталей аустенитного класса (μ <1,05) [1]. Поэтому контроль стабильности их магнитного состояния актуален, особенно когда речь идет о материалах и изделиях, имеющих толщину δ менее 5 мм. В этом случае даже незначительное воздействие на такие материалы внешнего магнитного поля, температур, пластических деформаций и других факторов может приводить к существенному изменению их магнитной проницаемости μ за счет перехода части структуры стали в ферромагнитную фазу, то есть в α -фазу. Появление незначительного количества α -фазы обуславливает ухудшение коррозионной стойкости аустенитного материала к агрессивным средам, изменение прочностных характеристик или других физико-механические свойств стали.

Для решения данной задачи требуется совершенствование старых и разработка новых поисковых средств.

На данный момент наибольшее распространение получил магнитный метод контроля [2], неразрушающий и менее трудоёмкий по сравнению с рентгеновским, металлографическим и химическим методами. Однако существующие на сегодняшний день конструкции преобразователей, при своих достоинствах, ограничивают возможности этого метода, снижая но-менклатуру контролируемых изделий и материалов, не обеспечивая их достаточную точность измерений.

В разных моделях феррозондовых ферритометров [3, 4] магниточувствительные элементы (МЧЭ) преобразователя (датчика), установленные соосно относительно друг друга в плоскости нейтрального сечения магнита, предназначенного для локального намагничивания материала, измеряют тангенциальную составляющую магнитного поля неоднородности этого материала или изделия. Их недостаток связан с тем, что измеряется неоднородность в одном направлении. В этом случае при вращении вокруг оси на $\pm 180^{\circ}$ они выдают неоднозначные результаты, которые требуют перепроверки. Их погрешность может составлять 15–20 %.

Более перспективно применение конструкции, где две пары МЧЭ установлены на противоположных сторонах магнита в плоскости его нейтрального сечения, ортогонально друг другу и работают в режиме градиентометра и полемера (рис.1, а). Другая перспективная модель предназначена для измерения нормальной составляющей магнитного поля рассеяния ферритной фазы (рис.1, б). В этой модели МЧЭ установлены параллельно друг другу на краях встроенного магнита. Они работают в режиме градиентометра и полемера. Их относительная погрешность измерения по обработанной поверхности материала толщиной, например, 10-20 мм составляет порядка 7-10 % и более [5-7]. При контроле материалов толщиной менее 4-5 мм погрешность измерений возрастает до 12-16 % и более. Увеличение погрешности измерений обусловлено тем, что локальное намагничивание материала встроенным в преобразователь магнитом приводит к образованию на его поверхностях разноименных магнитных зарядов [8]. Если неоднородность материала расположена вблизи противоположной сканированию поверхности (см. рис. 1, а), то есть у поверхности с противоположным знаком, то на МЧЭ градиентометрического преобразователя, измеряющего тангенциальную составляющую магнитного поля неоднородности материала, могут воздействовать разнополярные силовые линии этой неоднородности. В результате чего может уменьшиться результирующий выходной сигнал преобразователя и он не всегда сможет обнаружить участки с ферритной фазой, поэтому для оценки величины поля рассеяния неоднородности, его переключают в режим работы полемера.



Рис. 1. Сканирование поверхности изделия феррозондовыми датчиками: а – двухкомпонентный датчик; б – полемерный-градиентометрический датчик; в – однокомпонентный датчик; 1 – двухкомпонентный датчик; 2 – цилиндрический магнит; 3 – МЧЭ; 4 – изделие; 5 – магнит; H₁– остаточное магнитное поле рассеяния альфа-фазы

В то же время конструкция датчика позволяет проводить контроль одного и того же участка в пределах $\pm 180^{\circ}$, и одновременно перепроверять полученные по разным направлениям результаты измерений, что повышает достоверность и точность диагностики аустенитной стали.

Однако изготовление данных конструкций достаточно сложно. Как показывают исследования, для измерения α-фазы изделий толщиной менее 4–5 мм можно использовать более простую конструкцию локального магнитомодуляционного преобразователя, измеряющего нормальную составляющую магнитного поля неоднородности (рис.1, в). Такой преобразователь не имеет встроенного магнита. Он устанавливается непосредственно на поверхность сканируемого материала или изделия.

Практическое использование феррозондовой аппаратуры показывает, что первичные магнитомодуляционные преобразователи градиента магнитного поля приемлемы для работы, не требующей высокой точности измерений, если величина ложного сигнала, обусловленная неколлинеарностью магнитных осей МЧЭ преобразователя относительно его измерительной (продольной) оси, не превышает 400 у/см (0,0032 А/см² в СИ), а неидентичность коэффициентов преобразования МЧЭ составляет в единицах напряженности магнитного 450 γ/cM поля не более градиента (0,0032 A/см²), при напряженности магнитного поля Земли H_т порядка 0,5 Э (40 А/м) [9, 10].

Естественно, что для контроля ферромагнитной фазы аустенитных материалов, необходимы преобразователи, которые не восприимчивы к влиянию продольной H_y и поперечной H_z составляющих магнитного поля Земли, обуславливающих появление на выходе феррозондовых устройств ложных сигналов. В представленном преобразователе проблема ложных

сигналов решена с помощью встроенных в его рабочий корпус пермаллоевых компенсационных элементов [11–14]. Он позволяет исследовать магнитные свойства аустенитных сталей, изучать процессы старения, упорядочения, пластической деформации и другие изменения их структур, вызванные появлением ферритной фазы, выпадением карбидов и подобных образований.

Преобразователь работает по градиентометрической схеме, его МЧЭ (2,5 x 0,1 или 5,0 x 0,1 мм) установлены соосно друг другу и имеют базу 20 мм, диаметр рабочей части 3,0 мм, и общую длину 100 мм.

Определение ферромагнитной фазы изделия осуществляется следующим образом. Непосредственно перед сканированием участка поверхности изделия его промагничивают постоянным магнитом (например, использовался магнит размером 120 х 70 х 60, H=300-600 Э (или 2400–4800 А/м в СИ в зависимости от толщины изделия). После чего рабочую часть преобразователя устанавливают на поверхность изделия (см. рис 1, в) и путем последовательного перемещения преобразователя во взаимно ортогональных направлениях сканируют данный участок. В случае обнаружения неоднородности материала зоны очерчиваются и тщательно исследуются на наличие ферромагнитной фазы.

При контроле значительных участков поверхности изделия можно использовать несколько преобразователей, причем их можно объединять в любую конструкцию, например, цепочка, матрица и так далее.

Поскольку полученные результаты измерений зависят от магнитных характеристик контролируемого материала, неровностей поверхности изделий, количества и химического состава измеряемых ферромагнитных образований, то подобные исследования и градуировка прибора нуждаются в существенном метрологическом обеспечении. В частности, набора стандартных образцов, имеющих достаточное количество различных в процентном содержании ферромагнитных альфа-фаз.

Таким образом, рассмотренные конструкции феррозондовых преобразователей позволяют при сканировании поверхности изделий ($\delta \le 5$ мм) из стали аустенитного класса проводить локализацию и измерения ферромагнитных образований с погрешностью не более ± 5 % при содержании ферромагнитной фазы от 2,0 до 12 % и с погрешностью не более ± 7 % при содержании ферромагнитной фазы до 25 % и более. Применение программного обеспечения обработки результатов повышают технические возможности представленной аппаратуры.

Работа поддержана грантом РНФ (проект №15-12-00001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26364-84. Ферритометры для сталей аустенитного класса. – М., 1984. – 8 с.

2. **Химченко, Н. В.** Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении / Н. В. Химченко, В. А. Бобров. – М. : Машиностроение, 1978. – 264 с.

3. Прибор для контроля изменений магнитного состояния листов слабомагнитных аустенитных сталей – ферритометр Ф-01 / М. А. Веденеев [и др.] // Дефектоскопия. – 1994. – № 3. – С. 3–9.

4. Измеритель содержания ферритной фазы – ферритометр ФМ-3 / Б. М. Ригмант [и др.] // Дефектоскопия. – 1996. – № 5. – С. 78–83.

5. Пат. № 2130609 РФ, МПК¹³ G01N 27/87, G01N 27/72. Устройство для локального измерения ферромагнитной фазы аустенитных сталей / В. И. Пудов, М. Б. Ригмант, Э. С. Горкунов ; завитель и патентообладатель ИФМ УрО РАН. – Бюл. изобр. № 14 (Ш ч.). – 2 с.

6. **Пудов, В. И.** Определение ферромагнитной фазы в изделиях из сталей аустенитного класса / В. И. Пудов // Актуальные проблемы прочности материалов : материалы XLVI междунар. науч.-практ. конф., Витебск, 2007 г. : в 2 ч. – Витебск : ВГТУ, 2007. – Ч. 2. – С. 228–231.

7. **Пудов, В. И.** О повышении эффективности определения ферромагнитных включений в сталях аустенитного класса / В. И. Пудов, М. Б. Ригмант // Дефектоскопия. – 2002. – № 5. – С. 41–45.

8. **Туровский, Я.** Техническая электродинамика / Я. Туровский. – М. : Энергия, 1974. – 488 с.

9. **Пудов, В. И.** К вопросу балансировки дифференциального феррозондового преобразователя / В. И. Пудов // Дефектоскопия. – 1997. – № 11. – С. 33–36.

10. **Реутов, Ю. Я.** Разделение технологических факторов, обуславливающих влияние однородного поля на точность феррозондового градиентометра / Ю. Я. Реутов, В. И. Пудов // Дефектоскопия. – 1998. – № 1. – С. 28–33.

11. **Реутов, Ю. Я.** О компенсации ложных сигналов градиентометрического феррозонда / Ю. Я. Реутов, В. И. Пудов // Дефектоскопия. – 1998. – № 2. – С. 18–22.

12. **Пудов, В. И.** О компенсации неидентичности коэффициентов преобразования магниточувствительных элементов феррозонда / В. И. Пудов // Дефектоскопия. – 1999. – № 1. – С. 19–31.

13. Пудов, В. И. О компенсации ложного сигнала, обусловленного неколлинеарностью магнитных осей дифференциального магнитомодуляционного преобразования / В. И. Пудов, С. В. Жаков // Дефектоскопия. – 2000. – № 7. – С. 15–28.

14. **Пудов, В. И.** Модель и условия компенсации ложных сигналов дифференциальных магнитомодуляционных преобразователей : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.11 / Пудов Владимир Иванович. – Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, 2001. – 170 с.

E-mail: <u>pudov@imp.uran.ru</u>

УДК 621.3.082.744

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ, ОКРУЖАЮЩИХ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДАТЧИК УРОВНЯ РАСПЛАВА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕМ

И. С. САВИН, Е. А. СЛАВИНСКАЯ, И. В. ТЕРЕХИН

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Москва, Россия

UDC 621.3.082.744

REDUCING MEASUREMENT ERROR CAUSED BY CHANGING THE MAGNETIC PROPERTIES OF OBJECTS LOCATED AROUND EDDY CURRENT METAL LEVEL SENSOR IN THE MOULD WITH ELEC-TROMAGNETIC STIRRER

I. S. SAVIN, E. A. SLAVINSKAYA, I. V. TEREKHIN

Аннотация

В статье рассмотрена помеха от изменения магнитной проницаемости конструктивных элементов кристаллизатора при измерении уровня расплава вихретоковым датчиком. Приводятся результаты промышленных испытаний матричного вихретокового датчика встроенного типа на двух металлургических предприятиях с двумя различными перемешивателями. По результатам испытаний предложен метод снижения погрешности.

Ключевые слова:

электромагнитный перемешиватель стали, вихретоковый датчик, измерение уровня стали, кристаллизатор.

Abstract

In this paper measurement error caused by changing the magnetic permeability of constructive mould elements is considered. The results of industrial tests with electromagnetic stirrers are presented. According to the results error reduction method is suggested.

Key words:

electromagnetic stirrer of steel, eddy current sensor, steel level measurement, mould.

Введение

На сегодняшний день в металлургии широко применяются вихретоковые датчики. Например, в машинах непрерывного литья заготовок вихретоковый датчик измеряет уровень расплава в кристаллизаторе. В зависимости от типа датчика он устанавливается либо напротив медной стенки кристаллизатора (датчики встроенного типа) и измеряет уровень расплава по величине температуры медной стенки, либо над зеркалом расплава и измеряет расстояние между чувствительным элементом и расплавом (штативные и краевые/бортовые датчики) [1].

Для улучшения качества стальной заготовки кристаллизатор часто оснащается электромагнитным перемешивателем (ЭМП). ЭМП представляет собой статор машины переменного тока, чаще всего с 3 парами полюсов. ЭМП создает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует токи в расплаве. «Ротором» такого «асинхронного двигателя» является жидкая сталь. В результате перемешивания расплава улучшается качество слитка [2, 3].

ЭМП устанавливается в зоне выхода слитка из кристаллизатора. В обмотках ЭМП текут токи большой величины (100–500 A) и малой частоты (2–6 Гц). ЭМП создает помеху при измерении уровня расплава вихретоковым методом.

На данный момент исследование погрешности от ЭМП проводилось лишь в [4], где исследовалась наводка в измерительных катушках матричного вихретокового датчика встроенного типа. Кроме наводки помеха от ЭМП заключается и в другом явлении – изменении магнитной проницаемости µ магнитных и слабомагнитных объектов, окружающих датчик. Таким объектом чаще всего является конструктив кристаллизатора из нержавеющей стали, на который устанавливается датчик.

В рекламных материалах фирм Ergolines (Италия), Danieli (Италия) и VUHZ (Чехия) указывается, что вихретоковые датчики этих производителей работоспособны с ЭМП, но нигде в литературе нет данных о том, как этот результат был достигнут. Данная статья восполняет этот пробел.

В работе приводятся результаты экспериментального исследования в промышленных условиях погрешности от изменения магнитных свойств объектов, окружающих датчик.

Существо проблемы

Негативное влияние ЭМП при измерении уровня расплава вихретоковым датчиком проявляется в 2 моментах:

1) наведение ЭДС в измерительных обмотках;

2) изменение µ объектов, окружающих датчик.

Влияние ЭМП на показания датчика исследовалось на двух металлургических предприятиях с двумя различными ЭМП (Завод №1 и Завод №2). На заводах использовались 2 схожих по конструкции матричных вихретоковых датчика встроенного типа. Датчики состоят из одной большой накладной обмотки возбуждения и ряда измерительных обмоток. Число измерительных обмоток 10 штук (верхняя №1, нижняя №10). Измерительные обмотки расположены с шагом 20 мм. Оси измерительных обмоток параллельны оси обмотки возбуждения.

В первом случае датчик установлен в блюмовый кристаллизатор внутренним сечением 370х310 мм на плиту из слабомагнитной нержавеющей стали (рис. 1).



Рис. 1. Датчик, установленный на плиту из нержавеющей стали блюмового кристаллизатора (Завод №1): 1 – датчик; 2 – плита из нержавеющей стали; 3 – медная стенка; 4 – корпус ЭМП

Во втором случае датчик установлен в трубный кристаллизатор с внутренним диаметром медной гильзы 156 мм на рубашку из слабомагнитной нержавеющей стали (рис. 2). В обоих случаях расстояние от оси нижней измерительной обмотки до корпуса ЭМП составляет 300–310 мм.



Рис. 2. Датчик, установленный на рубашку из нержавеющей стали трубного кристаллизатора (Завод №2): 1 – датчик; 2 – рубашка из нержавеющей стали; 3 – медная гильза; 4 – корпус ЭМП

Основной помехой при измерении уровня с работающим ЭМП является изменение µ объектов, находящихся вблизи датчика. Датчик встроенного (и краевого) типа устанавливается на конструктив из нержавеющей стали, который обладает слабыми магнитными свойствами.

Для объяснения сути проблемы рассмотрим упрощенную систему, состояющую из трех элементов:

1) объект из слабомагнитной нержавеющей стали, на который устанавливается датчик;

2) вихретоковый датчик;

3) одна пара полюсов ЭМП (Для простоты понимания ЭМП с 3 парами полюсов заменяется одной парой. Такой «упрощенный» ЭМП создает пульсирующее магнитное поле, а не вращающееся.)

На рис. 3 схематично изображена кривая намагничивания стали. Т. к. в литературе нет данных о кривых намагничивания слабомагнитных нержавеющих сталей, то для объяснения физики процесса будем пользоваться данной кривой, полагая, что для нержавеющей стали качественно она похожа. Также примем допущение, что петля гистерезиса нержавеющей стали очень узкая и практически совпадает с основной кривой намагничивания. Ниже кривой намагничивания на рис. 3 изображен период тока в фазе ЭМП. В обмотках ЭМП текут токи малой частоты. Величины токов находятся в пределах 100–500 А. Из-за этих токов в окружающем пространстве изменяется напряженность магнитного поля. Токи возбуждения датчика малы (менее 4 А) и практически не изменяют напряженности поля. Напряженность магнитного поля изменяется во времени пропорционально току ЭМП. Каждому моменту времени на графике тока ЭМП соответствует рабочая точка с определенной индукцией В и µ на кривой намагничивания.

Справа от кривой намагничивания на рис. З изображена зависимость изменения индукции от времени, определенная графическим методом. Из-за симметричности кривой намагничивания относительно начала координат график зависимости индукции от времени симметричен относительно оси абсцисс.

Относительная магнитная проницаемость вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{H}}.$$

Таким образом, μ изменяется циклично с частотой, равной удвоенной частоте тока ЭМП. Зависимость μ от времени изображена пунктиром на рис. 3. В моменты времени, когда ток ЭМП равен нулю, μ равна начальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{нач}}$.



Рис. 3. Графическое определение µ

Напротив объекта, у которого циклично изменяется µ, установлен вихретоковый датчик, создающий свое переменное поле возбуждения, которое наводит вихревые токи в этом объекте. Таким образом, в ЭДС измерительной катушки на частоте тока возбуждения появляется составляющая, модулированная формой изменения µ.

На рис. 4 показана зависимость модуля U_{вн} при включении ЭМП. Ток ЭМП изменялся от 0 до установившегося значения (300 A) в течение 10–12 с. Видно, что в сигнале датчика присутствует составляющая с частотой, равной удвоенной частоте ЭМП.



Рис. 4. Зависимость модуля U_{вн} от изменения µ в 10 измерительной обмотке (дифференциальное включение) при включении ЭМП (Завод №1)

Снижение помехи от ЭМП

Наилучшим способом снижения помехи от изменения µ является установка датчика дальше от магнитных объектов или экранирование их от попадания поля возбуждения датчика.

В случае установки датчика, как на Заводе №2, следует дорабатывать рубашку, с целью установки вставки из немагнитного материала, на которую будет устанавливаться датчик. В случае установки датчика, как на Заводе №1, в плите из нержавеющей стали, на которую устанавливается датчик, следует делать выборку. В месте выборки, в случае необходимости, может быть установлен экран, который будет препятствовать наведению вихревых токов от возбуждения в плите.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mörmann.** Recent progress in fast and accurate meniscus level measurement for continuous casting machines / Mörmann, J. Schmid, S. Spagnul. // Proc. 7th European Continuous Casting Conference (ECCC) 2011, 27 June – 1 July 2011, Dusseldorf.

2. Бейтельман, Л. Улучшение качества сортовых заготовок путем электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе / Л. Бейтельман // Сталь. – 1997. – № 4.

3. Боровски, А. Применение электромагнитного перемешивателя на МНЛЗ / А. Боровски, Й. Сарторис, Р. Юргенс // Черные металлы. – 1998.

4. **Терехин, И. В.** Разработка вихретоковых средств контроля уровня жидкого металла в гильзовом кристаллизаторе при непрерывной разливке стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. : 2008.

E-mail: <u>Igorkoff@inbox.ru</u>

terekhin.iv@mail.ru

carpe ugulum@mail.ru

УДК 620.179.14

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТНЫХ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА СТАЛЕЙ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620.179.14 STRUCTURAL **FEATURES** OF THE SENSITIVITY OF THE **PARAMETERS** OF THE MINOR LOOPS OF MAGNETIC **HYSTERESIS OF STEELS** S. G. SANDOMIRSKI

Аннотация

Показано, что «специфические» изменения коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r на частных петлях магнитного гистерезиса сталей, происходящие при структурных изменениях в сталях, полностью определяются происходящими при этом изменениями магнитных параметров предельной петли гистерезиса: коэрцитивной силы H_{cs} и остаточной намагниченности M_{rs} и намагниченности M_s технического насыщения. Приведены формулы для расчета H_c и M_r по H_{cs} , M_{rs} , M_s и максимальной напряженности H_m магнитного поля частной петли гистерезиса. Приведены примеры анализа с использованием этих формул изменений H_c и M_r сталей при термических обработках. Сообщается о разработанных рекомендациях по эффективному использованию H_c и M_r в магнитной структуроскопии сталей.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, магнитный структурный анализ, магнитные измерения, частные петли магнитного гистерезиса, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность.

Abstract

It is shown that the "specific" changes in the coercive force H_c and the residual magnetization M_r on the on the minor loops of the magnetic hysteresis of steels, which occur during the structural changes in steels, are completely determined by the changes in the magnetic parameters of the saturation hysteresis loop: the coercive force H_{cs} and the remanent magnetization M_{rs} and the saturation magnetization M_{rs} . The formulas for calculating H_c and M_r for H_{cs} , M_{rs} , M_s and the maximum magnetic field H_m of a minor loops of the magnetic hysteresis are given. Examples of analysis using these formulas for the variation of H_c and M_r steels during thermal treatments are given. On the developed recommendations for the effective use of H_c and M_r in the magnetic structuroscopy of steels is reported.

Key words:

Non-destructive testing, magnetic structural analysis, magnetic measurements, minors hysteresis loop; remanent magnetization; coercive force.

Магнитными параметрами, чувствительными к структуре сталей, являются коэрцитивная сила H_{cs} и остаточная намагниченность M_{rs} . Магнитным параметром, чувствительным к фазовому составу стали, считают намагниченность M_s технического насыщения. Многообразие марок сталей и режимов их термических обработок предопределило использование для магнитной структуроскопии и других магнитных характеристик. Параметром контроля напряженного и структурного состояния стальных конструкций и трубопроводов стала коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r при перемагничивании сталей по частным петлям гистерезиса. Ученые пришли к выводу, что H_c , M_r и элементы матриц магнитных переменных частных петель гистерезиса чувствительнее к напряжениям в конструкции и структуре металла.

Но в попытках объяснения возможности такого контроля превалируют качественные рассуждения. Исследователи рассматривали влияние технологических факторов на H_c и M_r не в связи, а в противовес влиянию этих факторов на H_s , M_{rs} и M_s сталей. Это не позволяло провести необходимые обобщения.

В [1, 2] разработаны формулы, описывающие изменения намагниченности $M_m(H_m)$ на основной кривой намагничивания и намагниченности $M(H_m,H)$ на частных петлях магнитного гистерезиса сталей по максимальной напряженности H_m магнитного поля частной петли гистерезиса, действующему на материал магнитному полю H и H_s , M_{rs} и M_s стали. Для сокращенной записи формул введем обозначения:

$$K_{\Pi} = M_{rs} / M_{s}, T = tg(\pi K_{\Pi} / 2), k = \frac{M_{s}}{\pi} \frac{arctg(2T)}{M_{c} - 0.5\chi_{a}H_{cs}} - 1, h_{m} = H_{m} / H_{cs}, h_{c} = H_{c} / H_{cs},$$

$$\Psi = \sum_{n=1}^{2} A_{n}(h_{m}); A_{n}(h_{m}) = arctg(T[1 + (-1)^{n}h_{m}]), \tau = 1_{M}/\kappa A,$$
(1)

$$\chi_a \approx \frac{[0.5 + 0.06\tau H_{cs} - (0.068\tau H_{cs})^2]M_{rs}}{(2.9 + 35e^{-1.75\tau H_{cs}})H_{cs}} - 1, M_C \approx 0.67 \ [0.5 + 0.06\tau H_{cs} - (0.068\tau H_{cs})^2]M_{rs}.$$

Разработанные и экспериментально обоснованные в [1, 2] формулы в обозначениях (1) запишем в следующем виде.

Формула для основной кривой намагничивания:

$$M_{m} = \chi_{a} \frac{H_{m}}{1+h_{m}^{2}} + \frac{M_{s}}{\pi} \frac{h_{m}^{2}}{h_{m}^{2}+k} \left[\sum_{n=0}^{1} (-1)^{n} A_{n}(h_{m}) \right].$$
(2)

Формула для ветвей петли гистерезиса (знак «+» относится к восходящей ветви петли, а «-» – к нисходящей):

$$M = \chi_a \frac{H}{1+h^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{h_m^2}{h_m^2 + k} \left[2 \operatorname{arctg}[T(1+h)] - \Psi \right]$$
(3)

В [1, 2] показано, что изменения намагниченности сталей на частных петлях магнитного гистерезиса обусловлены только величиной H_m и изменениями H_{cs} , M_{rs} и M_s . Следовательно, это относится к H и M_r частных петель магнитного гистерезиса.

Формулы для расчета H и M_r [3, 4] сталей по H_{cs} , M_{rs} и M_s в обозначениях (1) запишем в виде:

$$h_c = 1 - tg(0,5\Psi)/T$$
 , (4)

$$M_{r} = \frac{M_{s}}{\pi} \frac{h_{m}^{2}}{h_{m}^{2} + k} (\pi K_{\Pi} - \Psi) .$$
 (5)

Формулы (4, 5) позволили проанализировать изменения H и M_r , происходящие в сталях при термических обработках. Установить особенности структурной чувствительности параметров частных петель магнитного гистерезиса сталей.

Эту возможность на рис.1 иллюстрируют результаты расчета по (4) зависимостей H стали 50 от температуры T_o отпуска после закалки [3]. Для построения зависимостей H (T_o) при разных H_m использованы зависимости $H_{cs}(T_o)$, $M_{rs}(T_o)$, $M_s(T_o)$ стали 50 в [5, рис.4, а, б, 5, а]. Изменения рассчитанных зависимостей H (T_o) при уменьшении H_m соответствуют изменениям экспериментальных зависимостей H (T_o) при уменьшении M_m соответствуют изменениям экспериментальных петель гистерезиса стали 50. Таким образом, изменения зависимостей H сталей от режима технического воздействия по мере изменения H_m (или B_m) частной петли магнитного гистерезиса полностью определяются изменениями ее H_{cs} , M_s и M_{rs} и соответствуют физике перемагничивания ферромагнитного материала в слабых магнитных полях. Какие именно изменения структуры металла вызвали изменения его H_{cs} , M_s и M_{rs} не имеет значения.


Рис. 1. Зависимости *H* стали 50 от температуры T_o отпуска после закалки при $H_m = 60$ кА/м (1); 5 кА/м (2); 3 кА/м (3); 2 кА/м (4) и 1 кА/м (5) (расчет по формуле (4)

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета по формуле (5) зависимостей M_r сталей 30 и 38ХС от температуры T_o их отпуска после закалки [4]. Для построения зависимостей $M_r(T_o)$ при разных H_m использованы результаты измерения зависимостей $H_{cs}(T_o)$, $M_{rs}(T_o)$ и $M_s(T_o)$ сталей 30 и 38ХС в [5], приведенные в табл. 1.

T _o ,°C	Сталь 30 [6, табл. 1.1]		Сталь 38XC [6, табл. 24.4]			
	H_{s}	M_s	M_{rs}	H_s	M_s	M_{rs}
150	2,25	1591	870	3,34	1540	808
200	2,10	1599	876	3,12	1545	833
250	1,43	1644	970	2,57	1555	866
300	1,22	1652	1007	2,42	1575	898
350	1,13	1650	1070	2,30	1585	918
400	0,995	1643	1145	1,85	1605	923
450	0,873	1645	1248	1,42	1620	948
500	0,876	1648	1265	1,23	1612	1081
550	0,866	1639	1277	1,13	1600	1154
600	0,834	1632	1280	1,08	1600	1201

Табл. 1. Влияние температуры T_o отпуска на магнитные свойства (в кА/м) сталей 30 и 38ХН по [6]



Рис. 2. Зависимость остаточной намагниченности M_{rs} на предельной петле гистерезиса (сплошная кривая, измерение в [5]) и остаточной намагниченности M_r на частной петле гистерезиса (пунктир, расчет по (5) с учетом (1)) сталей 30 (а) и 38XC (б) от их T_o отпуска: 1–5 – соответственно для $H_m = 1, 2, 3, 5$ и 10 кА/м

Представленные в табл. 1 и на рис. 2 данные на первый взгляд неожиданны. В соответствии с представлениями о характере изменения магнитных параметров среднеуглеродистых сталей от температуры их отпуска, зависимость $H_{cs}(T_o)$ сталей 30 и 38ХС имеет не монотонный характер в области 450 °C $\leq T_o \leq 550$ °C (табл. 1). Параметр M_s во всем диапазоне изменения T_o этих сталей изменяется незначительно и не монотонно. Это не позволяет использовать результаты измерения H_{cs} и M_s для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска сталей 30 и 38ХС. Параметр M_{rs} во всем диапазоне изменения T_o сталей 30 и 38ХС изменяется монотонно. Это, в принципе, позволяет использовать результаты измерения M_{rs} сталей 30 и 38ХС для контроля качества их средне- и высокотемпературного отпуска. Но диапазон изменения M_{rs} не широк: при изменении T_o сталей 30 и 38ХС от 150 до 600 °C, M_{rs} этих сталей изменяется в 1,47 и 1,49 раза. Это снижает достоверность контроля температуры отпуска сталей 30 и 38ХС по результатам измерения их M_{rs} .

Ситуация меняется при снижении H_m и измерении M_r на частной петле магнитного гистерезиса (рис. 2). При монотонности зависимости $M_r(T_o)$ во всем диапазоне изменения T_o сталей 30 и 38XC, диапазон изменения M_r радикально увеличивается. При изменении T_o сталей 30 и 38XC от 150 °C до 600°C, M_r этих сталей изменяется соответственно в 2,2 и 3,77 раза при $H_m = 5$ кА/м, в 4,34 и 11,9 раза при $H_m = 3$ кА/м, в 11,3 и 27,8 раза при $H_m = 2$ кА/м, в 66,1 и 129,2 раза при $H_m = 1$ кА/м. Отметим, что даже минимальная анализируемая напряженность намагничивающего поля $H_m = 1$ кА/м в 20 раз превышает напряженность (≈ 50 А/м) поля Земли.

Многократное увеличение диапазона изменения M_r сталей, измеренной на частных петлях гистерезиса в относительно сильных намагничивающих полях по сравнению с диапазоном возможного изменения M_{rs} сталей, создает хорошие предпосылки для достоверного контроля качества отпуска среднеуглеродистых сталей по результатам измерения их остаточной намагниченности M_r на частных петлях магнитного гистерезиса. Для реализации такого контроля намагничивание стали и измерение ее M_r должно осуществляться в замкнутой магнитной цепи. Необходимо также, чтобы перед контроля поступали в термически размагниченном состоянии – непосредственно после закалки и отпуска без использования электромагнитной шайбы. Должна быть обеспечена и стабильность напряженности H_m намагничивающего поля.

Анализ разработанных формул позволил установить особенности структурной чувствительности параметров частных петель магнитного гистерезиса сталей, разработать рекомендации по их эффективному использованию в магнитной структуроскопии сталей и сделать следующие

Выводы

1. Предпосылкой возможности использования коэрцитивной силы Н частной петли гистерезиса для магнитного структурного и фазового анализа служит не однозначный характер изменения Н_{сs} металла под влиянием изменения ΔT технологического фактора T при монотонном изменении M_s и постоянстве или противоположно направленном изменении M_{rs}. Областью эффективного применения метода являются металлы с не высокими значениями $K_{\Pi} \leq 0.6$. Условием структурной чувствительности *H* стали на частных петлях магнитного гистерезиса является монотонное изменение M_{rs} стали под влиянием ΔT при постоянстве H_{cs} и M_s . При этом H стали может быть в 1,5 раза более чувствительна к структурным превращениям в стали, вызывающим изменения его M_{rs} , чем сам параметр M_{rs} . Условием фазовой чувствительности Н стали является монотонное изменение намагниченности M_s стали под влиянием технологических факторов при постоянстве H_c и M_{rs} . При этом H стали может быть в 1,5 раза более чувствительна к фазовым изменениям стали, вызывающим изменения его M_s, чем сам параметр M_s. Оптимальные условия использования H стали для контроля изменений ее структурного состояния или фазового состава, обусловленных нарушениями ΔT процесса производства стали, обеспечиваются при *H_m*, близкой к *H_{cs}* стали, прошедшей обработку по заданному технологическому режиму Т.

Если зависимость $H_s(\Delta T)$ монотонна и однозначна, измерять H этой стали для ее магнитной структуроскопии нет смысла.

2. Установлено явление многократного расширения диапазона возможного изменения остаточной намагниченности M_r сталей на частных петлях магнитного гистерезиса при структурных изменениях в них по мере снижения H_m по сравнению с диапазоном возможного изменения M_{rs} сталей при тех же структурных изменениях. 1. Сандомирский, С. Г. Расчет изменения намагниченности на частных петлях гистерезиса сталей по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2016. – № 12. – С. 39–43.

2. Сандомирский, С. Г. Расчёт основной кривой намагничивания конструкционных сталей по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2017. – № 2. – С. 54–57.

3. Сандомирский, С. Г. Анализ структурной и фазовой чувствительности коэрцитивной силы частных петель гистерезиса сталей / С. Г. Сандомирский // Металлы. – 2014. – № 2. – С. 37–43.

4. Сандомирский, С. Г. Анализ влияния режимов термической обработки сталей на их остаточную намагниченность на частных петлях магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2016. – № 4. – С. 55–59.

5. Магнитный и вихретоковый контроль закаленной конструкционной стали, подвергнутой комбинированным деформационно-термическим обработкам / А. В. Макаров [и др.] // Дефектоскопия. – 2012. – № 12. – С. 3–17.

6. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 218 с.

УДК 620.179.14 СИНТЕЗ СТРУКТУРОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ – АЛЬТЕРНАТИВА «МНОГОПАРАМЕТРОВЫМ» МЕТОДАМ В МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620.179.14 SYNTHESIS OF STRUCTURE-SENSITIVE MAGNETIC PARAMETERS – AN ALTERNATIVE TO "MULTIPARAMETER" METHODS IN MAGNETIC STRUCTUROSCOPY S. G. SANDOMIRSKI

Аннотация

Показано, что «многопараметровые» методы магнитной структуроскопии, основанные на измерении магнитных параметров, точность измерения которых не высока, не могут обеспечить достоверного контроля структуры сталей. В качестве альтернативы предложено параметры, чувствительные к структурным изменениям в сталях, формировать из коэрцитивной силы H_c остаточной намагниченности M_r и намагниченности M_s технического насыщения, измеренных на предельной петле магнитного гистерезиса. Показано, что структурная чувствительность этих параметров выше или не хуже структурной чувствительности H_c , M_r , магнитных проницаемостей и релаксационных магнитных параметров, а измерены они могут быть проще и точнее.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, магнитный структурный анализ, магнитные измерения.

Abstract

It is shown that the "multiparameter" methods of magnetic structuroscopy, based on the measurement of magnetic parameters, the accuracy of which is not high, can not provide reliable control of the structure of steels. Alternatively, parameters that are sensitive to structural changes in steels are proposed, for the formation of which the residual magnetization M_r , the saturation magnetization M_s and the coercive force H_c , measured on the saturation hysteresis loop. It is shown that the structural sensitivity of these parameters is higher or no worse than the structural sensitivity of H_c , M_r , magnetic permeability's and relaxation magnetic parameters, and they can be measured more simply and more accurately.

Key words:

Non-destructive testing, magnetic structural analysis, magnetic measurements.

Магнитными параметрами, чувствительными к структуре сталей, являются коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r . Магнитным параметром, чувствительным к фазовому составу стали, считают намагниченность M_s технического насыщения. Относительная погрешность δ их измерения по методикам ГОСТ 8.377-80: $H - \pm 2$ %, M_r и M_s – не более ± 3 %, а отношение $K_{\Pi} = M_{rs}/M_s$ – с $\delta \approx \pm 1$ %.

Многообразие марок сталей и режимов их термических обработок предопределило использование для магнитной структуроскопии и других магнитных характеристик: максимальной μ_m , начальной μ_a и максимальной дифференциальной μ_{dm} магнитных проницаемостей, релаксационных намагниченности M_{Hr} и магнитной восприимчивости χ_r , намагниченности M_{rC} коэрцитивного возврата и др. В практически важных случаях они обладают высокой чувствительностью к изменениям структуры сталей, отличной от чувствительности H и M_r к ее изменениям. Но методики измерения μ_m , μ_a , μ_{dm} , M_{Hr} , M_{rC} и χ_r сложны и часто не регламентированы ГОС-Том, а δ измерения больше, чем у H_c , M_r и M_s . Это усложняет методы магнитной структуроскопии и снижает их достоверность.

Некоторые ученые предложили для расчета твердости HRC сталей суммировать с разными весовыми коэффициентами результаты измерения H, M_{Hr} и χ_r , их квадратичные члены и произведение $\chi_r M_{Hr}$. В другой модели суммируют результаты измерения градиентов поля от остаточной намагниченности объекта контроля после ряда намагничиваний импульсным полем разной напряженности и направления. Результат превзошел ожидания: коэффициент R корреляции результатов косвенных магнитных и прямых физических измерений HRC для многих сталей оказался близок к «1» (0,997 $\leq R \leq 0,999$).

Возможно ли такое? Ведь измерения указанных параметров проведены в ограниченных диапазонах изменения аппаратурой, у которой δ измерения составляет 5÷18 %. Каковы ограничения достижимого коэффициента *R* корреляции между результатами измерения и истинным значением физической величины, определяемые относительной погрешностью ее измерения и диапазоном изменения ?

В [1, 2] эти ограничения установлены и показано, что в указанных (и многих других) случаях аномально высокие R при определении твердости изделий и режима их отпуска по результатам измерений комплекса магнитных параметров получены путем подбора корректирующих коэффициентов к конкретным результатам измерения магнитных параметров и твердости сталей без учета реальных погрешностей измерения, набора статистических данных контроля при влиянии мешающих факторов и последующего корреляционного анализа. Реальные погрешности измерения использованных магнитных параметров не позволяют получить такую тесноту связи контролируемых механических свойств и информационных параметровых» методов.

Для формирования магнитных параметров сталей, обладающих высокой чувствительностью к изменениям структуры металла, простотой и точностью измерения, использованы разработанные формулы для расчета μ_m , μ_a , μ_d , M_{Hr} и χ_r , M_{rC} сталей и изделий из них по H, M_r и M_s , результаты анализа структурной и фазовой чувствительности этих параметров [3, 4].

Анализ позволил, в дополнение к *H_c* и *M_r*, сформировать магнитные параметры, чувствительные к изменениям структуры сталей:

$$K_{\Pi} = M_r / M_s; H_0 = H_c / \text{tg}(0.5\pi K_{\Pi}); F_1 = M_r / H_c; F_2 = M_r (1 - K_{\Pi})^2.$$
 (1)

Как следует из теоретических выкладок [5], параметр K_{Π} обладает более высокой структурной чувствительностью, чем M_r . Это подтверждают, например, зависимости M_r и K_{Π} стали 40Х1НВА от температуры T_o отпуска [6, табл. 28.2]. При изменении T_o от 350 до 600 °С параметр M_r изменяется в 1,45 раз, а K_{Π} – в 1,48 раз. При этом параметр K_{Π} по ГОСТ 3.377–80 может быть измерен в три раза точнее, чем M_r .

Параметр H_0 во многих случаях оказывается более чувствительным к структурным изменениям в сталях и изменениям их физико-механических свойств, происходящих при термических обработках, чем H_c . Например, в табл. 1 представлены изменения H_c , M_r , M_s , параметра H_0 и твердости HRC стали 45 в зависимости от температуры T_o отпуска.

Статистическая обработка результатов табл. 1 показала, что коэффициент R корреляции между H_c и HRC стали 45 во всем диапазоне изменения T_o составил 0,846, а между параметром H_0 и HRC – 0,882. В более узких (важных) интервалах изменения T_o эффективность использования параметра H_0 вместо H_c еще выше. Так, при изменении T_o стали 45 от 450 до 350 °C параметр H_c увеличивается в 1,24 раза, а H_0 – в 2,3 раза (табл. 1). При этом δ измерения H_c и H_0 практически одинаковы.

T _o ,°C	Результаты и	<i>H</i> ₀ , А/м			
	<i>H_c</i> , А/м	<i>M_r</i> , кА/м	<i>M_s</i> , кА/м	HRC	
20	3000	910	1557	60	2294
150	2700	919	1566	55	2048
200	2460	932	1574	53	1834
250	1550	1027	1634	50	1023
300	1340	1018	1631	45	898
350	1260	1021	1631	45	839
400	1120	1136	1627	42	575
450	1020	1271	1626	37	364
500	1030	1276	1625	34	361
550	1050	1280	1617	29	357
600	1040	1248	1606	26	380
650	880	1250	1597	20	313

Табл. 1. Магнитные свойства и твердость стали 4	4	-5
---	---	----

На рис. 1 и 2 сопоставлено влияние температуры T_o отпуска после закалки сталей 30 и 45 на результаты измерения в [6, табл.1.1 и 3.1] их μ_m и M_{Hr} и расчета параметров F_1 и F_2 этих сталей.



Рис. 1. Влияние температуры T_o отпуска стали 30 после закалки от 850 °C на результаты измерения ее $\mu_m(a, \bullet)$ и $M_{Hr}(\mathfrak{G}, \blacktriangle)$ и расчета параметров $F_1(a, o)$ и $F_2(\mathfrak{G}, \Delta)$ этой стали [7]



Рис. 2. Влияние T_0 стали 45 после закалки от 850 °С на данные измерения ее $\mu_m(a, \bullet)$ и $M_{Hr}(6, \blacktriangle)$ и расчета $F_1(a, o)$ и $F_2(6, \Delta)$ этой стали [8]

Результаты (рис.1, а и 2, а) показывают, что зависимости $\mu_m(T_o)$ и 0,5 $F_1(T_o)$ практически совпадают. Погрешности δ измерения μ_m и расчета F_1 равны, но параметр F_1 может быть измерен на порядок проще, чем μ_m .

Зависимости $M_{Hr}(T_o)$ и 1,2 $F_2(T_o)$ также совпадают с точностью до погрешностей эксперимента (рис.1, б, 2, б). Но δ расчета F_2 по результатам измерения M_r и K_{Π} вдвое меньше δ измерения M_{Hr} .

Параметры K_{Π} , H_0 , F_1 и F_2 могут быть использованы в комбинациях друг с другом и с H_c и M_r .

Выводы

1. Аномально высокие коэффициенты R корреляции (до R = 0,999) при определении твердости изделий и режима их отпуска по результатам измерений комплекса магнитных параметров получены ряде работ путем подбора корректирующих коэффициентов к конкретным результатам измерения магнитных параметров без учета реальных погрешностей измере-

ния, набора статистических данных контроля при влиянии мешающих факторов и последующего корреляционного анализа.

2. Предложено в магнитной структуроскопии использовать параметры (1), синтезированные из H_c , M_r и M_s сталей. Показано, что структурная чувствительность этих параметров выше или не хуже структурной чувствительности H_c , M_r , магнитных проницаемостей и релаксационных магнитных параметров, а измерены они могут быть проще и с более высокой точностью.

3. Полученный результат позволяет при разработке приборов магнитной структуроскопии изделий в замкнутой магнитной цепи сосредоточить внимание на повышении точности измерения H_{cs} , M_{rs} и M_s материала изделий и отказаться от сложных и не точных измерений других магнитных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандомирский, С. Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между ее истинными значениями и результатами измерения / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 13–17.

2. Сандомирский, С. Г. О коэффициенте корреляции между результатами измерения и расчета твердости сталей при «многопараметровых» методах контроля / С. Г. Сандомирский // XXI Всероссийская конф. по неразрушающему контролю и техн. диагностике : сб. тр., Москва, 28 февр.–2 марта 2017 г. – М. : Спектр, 2017. – С. 231–246.

3. Сандомирский, С. Г. Возможности и ограничения использования измерений релаксационных магнитных параметров сталей в магнитном структурном анализе (обзор) / С. Г. Сандомирский // В мире НК. – 2013. – № 4. – С. 5–11.

4. **Sandomirski, S. G.** Analysis of the structural sensitivity of the permeability of steels / S.G. Sandomirski // Reports the 19th WCNDT 2016 in Munich, Germany. Rep. P 41. P. 1–8.

5. **Тикадзуми, С.** Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1987. – 419 с.

6. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 218 с.

7. Сандомирский, С. Г. Синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей из параметров их предельной петли магнитного гистерезиса / С.Г. Сандомирский // XXI Всерос. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике: сб. тр., Москва, 28 февр.–2 марта 2017 г. – М. : Изд. дом «Спектр», 2017. С. 246–261.

8. Сандомирский, С. Г. Формирование структурочувствительных параметров из параметров предельной петли магнитного гистерезиса сталей / С. Г. Сандомирский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апр. 2017 / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов. – Могилев, 2017. – С. 358–359.

УДК 535.51 СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СЛОЯ ОКСИДА ЦИНКА, ДОПИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕМ, НА ПЛАСТИНЕ К8

*Н. И. СТАСЬКОВ, В. В. ФИЛИППОВ, Б. Г. ШУЛИЦКИЙ, И. А. КАШКО

*УО «Могилёвский государственный университет им. А. А. Кулешова» УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Могилев, Минск Беларусь

UDC 535.51

SPECTROPHOTOMETRY OF ZINC OXIDE LAYER DOPED WITH ALUMINUM ON K8 PLATE N. I. STASKOV, V. V. PHILIPPOV, B. G. SHULITSKY, I. A. CASCO

Аннотация

Ширина запрещенной зоны слоя оксида цинка с двухпроцентным содержанием алюминия, определенная по спектрам пропускания и отражения, удовлетворительно коррелирует с соответствующей величиной из формулы Adachi-New Forouhi по данным метода спектральной эллипсометрии.

Ключевые слова:

спектры пропускания и отражения; слой оксида цинка с алюминием; формула Adachi-New Forouhi; спектральная эллипсометрия.

Abstract

The band gap of a zinc oxide layer with a 2% aluminum content, determined from the transmission and reflection spectra, correlates satisfactorily with the corresponding value of the Adachi-New Forouhi formula from the spectral ellipsometry method.

Key words:

transmission and reflection spectra, zinc oxide layer with aluminum, Adachi-New Forouhi formula, spectral ellipsometry.

Слои оксида цинка, допированные алюминием (ZnO:Al), имеют высокую прозрачность и хорошую проводимость. Это определяет их перспективы широкого использования в различных устройствах оптоэлектроники. В зависимости от методов получения и условий формирования оптические свойства слоев могут заметно варьироваться, поэтому контроль этих свойств является неотъемлемым этапом последующего применения. Цель данной работы определить наиболее оптимальную методику расчета оптических характеристик слоя ZnO:Al, нанесенного ВЧ магнетронным распылением на стекло K8, по спектрам пропускательных $T(\lambda)$ и отражательных $R(\lambda)$ способностей для волн TE и TM поляризации при углах падения не равных нулю. Известно [1], что среду с показателем преломления $N(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$ можно характеризовать коэффициентом поглощения $\alpha_f(\lambda)$, который зависит от показателя поглощения $k_f(\lambda)$ и длины волны

$$\alpha_f(\lambda) = \frac{4\pi k_f(\lambda)}{\lambda}.$$
 (1)

Спектр $\alpha_f(\lambda)$ позволяет определить такую важнейшую характеристику полупроводника как E_g . Для этого используется уравнение

$$\left[\alpha_f(E)E\right]^2 = B\left(E - E_g\right),\tag{2}$$

в котором $E = 1240\lambda^{-1}$ – энергия фотона (длина волны λ берется в нм) [2].

Для определения коэффициента поглощения рекомендуется упрощенный спектрофотометрический метод [2], основанный на измерении $T(\lambda)$ слоя толщины h_f , который измеряется в сантиметрах, и использовании эмпирического закона Бугера

$$\alpha_f(\lambda) = 2,303h_f^{-1}\log[T(\lambda)^{-1}].$$
 (3)

В работе [3] для определения E_g предлагается экстраполировать линейную часть зависимости $(-\ln T(E))^2$ до пересечения с осью *E*.

Увеличение $\alpha_f(\lambda)$ при увеличении *E* происходит не только из-за роста $k_f(\lambda)$, но и из-за увеличения показателя преломления материала слоя $n_f(\lambda)$. Последнее приводит к уменьшению $T(\lambda)$ из-за увеличения $R(\lambda)$. В то же время, с изменением длины волны на спектр $\alpha_f(\lambda)$ может оказывать влияние дисперсия показателя преломления и слабое поглощение подложки [4], на которой находится исследуемый слой.

Аналитическое определение оптических функций $n_f(\lambda)$ и $k_f(\lambda)$ в работе [5] основывается на процедуре построения плавных огибающих интерференционных максимумов и минимумов спектра $T(\lambda)$ пленки на плоскопараллельной прозрачной пластине с заведомо известной дисперсионной зависимостью $n_s(\lambda)$. Такой способ использовался в работе [6] для определения показателя преломления слоя $SrTiO_3$.

Вклад отражательной способности в величину коэффициента поглощения попробуем оценить с помощью выражения

$$\alpha_f(\lambda) = 2,303h_f^{-1}\log[T(\lambda) + R(\lambda)]^{-1}.$$
(4)

Обоснование формулы (4) приведем в экспериментальной части работы. Мы допускаем, что учет отражательной способности в выражении (4) должен устранить влияние интерференции света в слое на спектр $\alpha_f(\lambda)$. Последнее утверждение вытекает из закона сохранения энергии

$$T(\lambda) + R(\lambda) = 1 - A(\lambda),$$

в котором можно предположить, что поглощательная способность $A(\lambda)$ пропорциональна произведению $\alpha_f(\lambda)h_f$. Это допущение приводит к выражению (4).

Известны две методики определения параметров слоя и пластины, в которых учитываются потери света из-за деления лучей на всех границах раздела. В одной из них [7] получены формулы для отражательных и пропускательных способностей, когда неограниченный пучок TE (s) и TM (p) поляризованных лучей падает наклонно ($\phi \neq 0$) на слой. В предельном случае ($\varphi = 0$) выражения для $T(\lambda)$ и $R(\lambda)$ переходят в соответствующие выражения из работы [8]. Для определения оптических и геометрических характеристик слоя и пластины необходимо измерить: спектры $T_s(\lambda)$ и $R_{s}(\lambda)$ пластины без слоя; спектры $T_{t}(\lambda)$ и $R_{t}(\lambda)$ пластины со слоем при падении света со стороны слоя; спектры $Rb_t(\lambda)$ при падении света со стороны пластины. По соответствующим выражениям для $T_s(\lambda)$, $R_s(\lambda)$ можно аналитически оценить дисперсию $n_s(\lambda)$, коэффициент поглощения пластины $\alpha_s(\lambda)$ и из выражений для $T_t(\lambda)$, $R_t(\lambda)$, $Rb_t(\lambda)$ легко получить вначале выражения для расчета спектров $R_f(\lambda)$, $Rb_f(\lambda)$, $T_f(\lambda)$ слоя на неограниченной пластине, а затем найти все параметры слоя. Другими словами, обратная задача спектрофотометрии для слоя на пластине сводится к обратной задаче для слоя на известной подложке, которая рассматривалась в работе [5]. Контроль параметров $n_s(\lambda)$ и $\alpha_s(\lambda)$ до нанесения слоя необходим из-за того, что пластины тщательно обрабатывают разными методами.

Вторая методика [9] учитывает частичное перекрытие падающего миллиметрового пучка с отраженным пучком и падающего пучка с прошедшим пучком при наклонном падении света на толстую пластину. В указанной работе приводятся формулы для расчета разностей хода ограниченного числа ТЕ и ТМ поляризованных лучей и формулы для расчета спектров $T_t(\lambda)$ и $R_t(\lambda)$. Такой подход к решению оптической задачи позволяет выявить влияние нижней грани стеклянной пластины на определяемые параметры слоя.

В настоящее время в методах спектрофотометрии и эллипсометрии рассматриваются возможности определения оптических характеристик полупроводниковых материалов на основании дисперсионных формул для

диэлектрической проницаемости, в которые входят ширина запрещенной зоны, энергия фотона, на которую приходится максимум показателя поглощения, значение показателя преломления при $\lambda \to \infty$ и другие.

Из имеющихся в программном обеспечении спектрального эллипсометра Horiba UVISEL (Horiba-JobinYvon, Longjumeau, Франция) [10] дисперсионных формул для диэлектрической проницаемости интерес представляет формула Adachi-New Forouhi. С помощью этой формулы определены обе оптические функции ZnSe [11] в УФ ($E > E_g$) и видимой ($E < E_g$) областях спектра.

Непосредственно перед напылением, с целью глубокой очистки, поверхности стеклянной пластины обрабатывали ионным пучком в течении 10 мин. Слой на пластине сформировали магнетронным ВЧ распылением мишени ZnO:Al₂O₃ (фирма KurtJ.Lesker, концентрация Al₂O₃ в ZnO – 2 %, диаметр мишени – 75 мм) в среде Ar при давлении в камере 1 Па. Время распыления – 45 мин, мощность ВЧ разряда – 600 Вт, расстояние от пластины до мишени – 100 мм. Пластина с растущим слоем не подогревалась. Для получения однородности осаждаемых слоев по толщине, пластина вращалась вокруг своей оси.

Толщина пластины была измерена на оптиметре ($h_s = 2,14$ мм). Спектры $T_s(\lambda)$, $R_s(\lambda)$ пластины без слоя и $T_t(\lambda)$, $R_t(\lambda)$, $R_{bt}(\lambda)$ пластины со слоем ZnO:Al для волн TE и TM поляризации измерялись при углах падения света на слой 8° и 40° на спектрофотометре Photon RT производства ООО «ЭссентОптикс» (г. Минск) в спектральной области от 370 до 950 нм ($\Delta RR^{-1} = 10^{-3}$, $\Delta \lambda = 1,6$ нм).

На рис. 1 дискретными точками представлены вышеперечисленные экспериментальные ($\varphi = 40^{\circ}$) спектры исследуемой структуры слойпластина для волн ТЕ поляризации. Максимумы спектра $T_t(\lambda)$ приходятся на минимумы спектра $R_t(\lambda)$, а поглощательная способность слоя $A_f(\lambda)$ монотонно уменьшается с увеличением λ , достигает минимума и снова начинает увеличиваться. Это подтверждает возможность исключения влияния интерференции света в слое на спектр $\alpha_f(\lambda)$, если учесть отражательную способность. В области указанного минимума спектр $T_s(\lambda)$ чистой пластины лишь в одной точке касается максимума спектра $T_t(\lambda)$, а спектр $R_s(\lambda)$ пластины ограничивает минимумы спектра $R_t(\lambda)$. Это указывает на наличие очень тонкого неоднородного слоя на ZnO:Al. При $\lambda < 435$ нм $T_s(\lambda)$ начинает уменьшаться, возможно, из-за увеличения коэффициента поглощения пластины.



Рис. 1. Графики зависимостей *T R* от λ : экспериментальные точки 1 – $T_{s}(\lambda)$; 2 – $T_t(\lambda)$; 3 – $R_t(\lambda)$; 4 – $R_s(\lambda)$; 5 – $A_t(\lambda)$; 6 – $A_s(\lambda)$; рассчитанные (сплошные кривые:7 – $T_t(\lambda)$; 8 – $R_t(\lambda)$; 9 – $A_t(\lambda)$ – спектры для волн ТЕ поляризации

Спектры $n_s(\lambda)$ и $\alpha_s(\lambda)$ очищенной пластины, определенные по спектрам $T_s(\lambda)$ и $R_s(\lambda)$, удовлетворительно коррелируют с известными спектрами для стекла К8.

По восьми спектрам $T_t(\lambda)$, $R_t(\lambda)$, которые измерены при двух углах и двух поляризациях световых волн, на основании формул из работы [9] численно определялись три параметра слоя – $n_f(\lambda)$, $k_f(\lambda)$ и h_f . Толщина слоя оказалась равной 353,3 нм. Невязка измеренных и рассчитанных спектров (рис. 1) составляет 0,023. Невязка между измеренными и рассчитанными спектрами, когда использовались формулы из работы [7], составляет 0,029.



Рис. 2. Спектры $(\alpha_f(E)E)^2$ слоя ZnO:Al

На рис. 2 приведены зависимости величин $[\alpha_f(E)E]^2$ от энергии фотонов *E*, когда $\alpha_f(\lambda)$ находилась с использованием выражений (3) (кривая 1, $\varphi = 8^\circ$); (1) (кривая 2); (4) (кривая 3, $\varphi = 8^\circ$); (4) (кривая 4, $\varphi = 40^\circ$).

Ширина запрещенной зоны, определенная по точке пересечения продолжения линейного участка кривой $\left[\alpha_{f}(E)E\right]^{2}$ с осью *E*, равна 3,15 эВ.

Спектры эллипсометрических параметров Ic(E) и Is(E) структуры слой ZnO:Al – стеклянная пластина измеряли на спектральном эллипсометре Horiba UVISEL диапазоне длин волн 210 нм $\leq \lambda \leq 400$ нм при угле падения 70°.

Использовалась электродинамическая модель: стеклянная подложка, слой ZnO:Al (формула Adachi-New Forouhi), поверхностный слой, состоящий из ZnO:Al и воздуха (модель Бруггемана). Наименьшая невязка (0,019) рассчитанных и соответствующих измеренных спектров Ic(E) и Is(E) достигнута для параметров ZnO:Al: $n_{\infty} = 1,705$, $E_g = 3,109$ эB, $f_j = 1,164$, $w_j = 3,286$ эB, $\gamma_i = 0,147$ эB, $A_0 = 9,68$, $\Delta_0 = 0,394$ эB, $\gamma_0 = 0,024$ эB, $h_f = 278/8$ нм. Поверхностный слой включает 26,5 % ZnO:Al и 73,5 % воздуха. Его толщина 7 нм. Ширина запрещенной зоны ZnO:Al в этом случае оказалась равной 3,109 эB.

Приведенные данные (рис. 2) показывают, что величины E_g , рассчитанные по спектру $k_f(\lambda)$ с использованием выражения (1) и по спектрам $T_t(\lambda)$ и $R_t(\lambda)$ с использованием выражения (4), одинаковые. Однако, спектры показателя поглощения слоя, рассчитанные по выражениям (4) и (1), существенно отличаются от спектров $k_f(\lambda)$, рассчитанных по восьми

поляризованным спектрам. Работа выполнена при поллержке Г

Работа выполнена при поддержке ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» №20161337 от 06.05.2016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн, М. Основы оптики : пер. с англ. / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 856 с.

2. **Уханов, Ю. И.** Оптические свойства полупроводников / Ю. И. Уханов. – М. : Наука, 1977. – 368 с.

3. Оптические и структурные характеристики пленок оксида цинка, легированных галлием / О. А. Новодворский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, вып. 4. – С. 439–444.

4. Gonzalez-Leal, Juan-Maria. Influence of substrate absorption on the optical andgeometrical characterization of thin dielectric films / Juan-Maria Gonzalez-Leal, Rafael Prieto-Alcon, Jose-Andres Angel, Dorian A. Minkov, Emilio Marquez // Ap-

plied Optics. – 2002. –Vol.41, № 34. – P. 7300–7308.

5. Коновалов, О. П. Определение оптических констант слабо поглощающих диэлектрических слоев на прозрачной подложке / О. П. Коновалов, И. И. Шаганов // ОМП. – 1988. – № 8. – С. 39–41.

6. Оптические свойства пленок титаната стронция, сформированных зольгель методом на кварцевых подложках / А. И. Кулак [и др.] // ЖПС. – 2017. – Т. 84, № 1. – С. 150–153.

7. **Minkov, D.** Computation of the optical constants of a thin dielectric layer on a transmitting substrate from the reflection spectrum it inclined incidence of light / D. Minkov // JOSA A. –1991. – Vol. 8, N 2. – P. 306–310.

8. Vriens, L. Opticalconstantsofabsorbingthinsolidfilmsonasubstrate / L. Vriens, W. Rippens // Applied Optics. – 1983. – V. 22, № 24. – P. 4105–4110.

9. **Penzkofer, A.** Optical constants measurement of single-layer thin films on transparent substrates / A. Penzkofer, E. Drotleff, W. Holzer// Optics Communications. – 1998. – V. 158. – P. 221–230.

10. http://www.horiba.com/scientific/products/ellipsometers/spectroscopic-ellipsometers/uvisel/uvisel-spectroscopic-ellipsometer-covering-a-range-from-fuv-to-nir-640/

11. Antohel, S. Romanian Reports in Physics / S. Antohel, L. Ionl, Mihaela-Girtan, O. Tomal // -2013 - V.65, No 3 - P.805-811.

УДК 535.51

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЯ ОКСИДА ЦИНКА, ДОПИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕМ

Н. И. СТАСЬКОВ, И. В. ИВАШКЕВИЧ, С. С. МИХЕЕВ

УО «Могилёвский государственный университет им. А. А. Кулешова» Могилев, Беларусь

UDC 535.51 OPTICAL CHARACTERISTICS OF ZINC OXIDE LAYER DOPED WITH ALUMINUM N. I. STASKOV, I. V. IVASKEVICH, S. S. MIKHEEV

Аннотация:

Оптические свойства слабо поглощающей полупроводниковой пленки Zn0:Al на стеклянной подложке K8 определяются методами спектрофотометрии и спектральной эллипсометрии.

Ключевые слова:

оптические свойства Zn0:Al, спектрофотометрия и спектральная эллипсометрия Zn0:Al, показатель преломления и показатель поглощения Zn0: Al.

Abstract:

Optical properties of the low absorbing semiconductor Zn0:Al film on the glass K8 substrate are determined by the methods of spectrophotometry and spectral ellipsometry.

Key words:

Optical properties Zn0:Al, spectrophotometry and spectral ellipsometry Zn0:Al, refractive index and absorption index Zn0:Al.

Чистый оксид цинка (ZnO) – прозрачный (в диапазоне $\lambda > 370$ нм), кристаллический ($n_e = 2,015$, $n_o = 1,998$, $\lambda = 632,8$ нм), прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны $E_g = 3,35$ эВ [1, 2]. Допированные алюминием слои ZnO:Al применяются в различных областях микроэлектроники в качестве нетоксичного, слабо поглощающего проводника. Слой наносят на стеклянную или полимерную подложку различными методами (например, магнетронным распылением). С изменением концентрации Al в ZnO изменяются ширина запрещенной зоны E_g , оптические и электрические свойства слоя. Для определения такой важнейшей характеристики полупроводника, как E_g , используют экспериментальные данные для спектра коэффициента поглощения $\alpha_f(\lambda)$. При этом используется уравнение [3]

$$\left[\alpha_f(E)E\right]^2 = B\left(E - E_g\right),\tag{1}$$

в котором $E = 1240\lambda^{-1}$ – энергия фотона (длина волны λ берется в нм).

Известно [4], что среду с показателем преломления $N(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$ можно охарактеризовать коэффициентом поглощения $\alpha_f(\lambda)$, который зависит от показателя поглощения $k_f(\lambda)$ и длины волны:

$$\alpha_f(\lambda) = 4\pi k_f(\lambda)/\lambda. \tag{2}$$

В связи с этим спектр показателя поглощения $k_f(\lambda)$ чаще всего определяют по спектру коэффициента поглощения $\alpha_f(\lambda)$ на основании экспериментального спектра пропускательной способности $T(\lambda)$ слоя толщины h_f и эмпирического закона Бугера[5]:

$$\alpha_f(\lambda) = 2,303h_f^{-1}\log[T(\lambda)^{-1}].$$
(3)

При таком подходе к определению $k_f(\lambda)$ надо учесть, что увеличение α_f при увеличении E происходит не только из-за роста показателя поглощения, но и из-за увеличения показателя преломления материала слоя $n_f(\lambda)$. Последнее приводит к уменьшению $T(\lambda)$ из-за увеличения отражательной способности слоя $R(\lambda)$. Еще надо учесть, что с изменением длины волны на спектр $\alpha_f(\lambda)$ может оказывать влияние дисперсия показателя преломления и поглощения подложки [6], на которой находится исследуемый слой.

Цель данной работы – методами спектрофотометрии и спектральной эллипсометрии определить спектры показателей поглощения слабо поглощающего слоя ZnO:Al.

Известны две методики определения параметров слоя и подложки, в которых учитываются потери света из-за деления лучей на всех границах раздела. В работе [7] получены формулы для отражательной и пропускательной способностей слоистой среды, когда неограниченный пучок TE (s) и TM (p) поляризованных лучей падает на нее наклонно ($\varphi \neq 0$). Для определения оптических и геометрических характеристик слоя и пластины необходимо измерить спектры $T_s(\lambda)$ и $R_s(\lambda)$ пластины без слоя; спектры $T_t(\lambda)$ и $R_t(\lambda)$ пластины со слоем при падении света со стороны слоя и спектры $R_{bt}(\lambda)$ при падении света со стороны пластины. Контроль параметров $n_s(\lambda)$ и $\alpha_s(\lambda)$ до нанесения слоя необходим из-за того, что поверхность пластины тщательно обрабатывают разными методами.

Вторая методика, по которой можно найти параметры слоя и пластины [8], учитывает частичное перекрытие падающего миллиметрового пучка с отраженным пучком и падающего пучка с прошедшим пучком из-за наклонного падения света на толстую пластину подложки. В указанной работе приводятся формулы для расчета разностей хода ограниченного числа ТЕ и ТМ поляризованных лучей, и формулы для расчета спектров $T_t(\lambda)$ и $R_t(\lambda)$. Такой подход к решению оптической задачи позволяет выявить влияние нижней грани стеклянной подложки на определяемые параметры слоя.

В работе [9] для расчета спектров $T_t(\lambda)$, $R_t(\lambda)$ и $Rb_t(\lambda)$ многослойного интерференционного покрытия на подложке конечной толщины использовалось строгое решение электродинамической задачи. При этом, как и в работе [7], не ограничивался фронт падающих, отраженных и прошедших волн. Допускалось, что основной характеристикой спектрофотометра является полуширина аппаратной функции монохроматора или спектральное разрешение. Разработанные программы позволяют учесть конечность толщины пластины и поглощение света во всех слоях структуры, в том числе и в пластине. При этом не накладываются какие-либо ограничения на толщины слоя и пластины.

В настоящее время в методах спектрофотометрии и эллипсометрии рассматриваются возможности определения оптических характеристик полупроводниковых материалов на основании дисперсионных формул для диэлектрической проницаемости. Из имеющихся в программном обеспечении спектрального эллипсометра Horiba UVISEL (Horiba Jobin Yvon, Longjumeau, Франция) [10] дисперсионных формул для диэлектрической проницаемости интерес представляет формула Adachi-New Forouhi, с помощью которой определены обе оптические функции ZnSe [11] в УФ $(E > E_a)$ и видимой $(E < E_a)$ областях спектра.

Перед нанесением слоя поверхности стеклянной пластины обрабатывали ионным пучком в течение 10 мин. Слой на пластине сформировали магнетронным BЧ распылением мишени ZnO:Al₂O₃ (фирма Kurt J. Lesker, концентрация Al₂O₃ в ZnO – 2 %, диаметр мишени – 75 мм) в среде Ar при давлении в камере 1 Па. Время распыления – 45 мин, мощность BЧ разряда – 600 Вт, расстояние от пластины до мишени – 100 мм. Пластина с растущим слоем не подогревалась. Для получения однородности осаждаемых слоев по толщине пластина вращалась вокруг своей оси.

Толщина подложки $h_s = 2,14$ мм в виде плоскопараллельной пластины была определена оптиметром. Спектры $T_s(\lambda)$, $R_s(\lambda)$ подложки без слоя и $T_t(\lambda)$, $R_t(\lambda)$, $R_{bt}(\lambda)$ пластины со слоем ZnO:Al для волн TE и TM поляризации измерялись при углах падения света на слой 8^0 и 40^0 на спектрофотометре Photon RT производства ООО «ЭссентОптикс» (г. Минск) в спектральной области от 370 до 950 нм ($\Delta RR^{-1} = 10^{-3}$, $\Delta \lambda = 1,6$ нм). Спектры $n_s(\lambda)$ и $\alpha_s(\lambda)$ очищенной пластины, определенные по спектрам $T_s(\lambda)$ и $R_s(\lambda)$, удовлетворительно коррелируют с данными известной дисперсионной таблицы для стекла K8.

На рис. 1 дискретными точками представлены вышеперечисленные экспериментальные спектры структуры слой–пластина для волн ТМ поляризации, измеренные при $\varphi = 8^{0}$. Видно, что максимумы спектра $T_{t}(\lambda)$ приходятся на минимумы спектра $R_{t}(\lambda)$, а поглощательная способность слоя $A_{t}(\lambda)$ монотонно уменьшается с увеличением λ , достигает минимума и

снова начинает увеличиваться. Это подтверждает возможность исключения влияния интерференции света в слое на спектр $\alpha_f(\lambda)$, если учесть отражательную способность в выражении (4). В области указанного минимума спектр $T_s(\lambda)$ чистой пластины лишь в одной точке касается максимума спектра $T_t(\lambda)$, а спектр $R_s(\lambda)$ пластины ограничивает минимумы спектра $R_t(\lambda)$. Это указывает на наличие очень тонкого неоднородного слоя на ZnO:Al. При $\lambda < 435$ нм $T_s(\lambda)$ начинает уменьшаться (верхняя кривая, рис. 1), возможно, из-за увеличения коэффициента поглощения пластины.



Рис. 1. Экспериментальные (дискретные точки: $1 - T_s(\lambda)$; $2 - T_t(\lambda)$; $3 - R_t(\lambda)$; $4 - R_s(\lambda)$; $5 - A_t(\lambda)$; $6 - A_s(\lambda)$) и рассчитанные (сплошные кривые: $7 - T_t(\lambda)$; $8 - R_t(\lambda)$; $9 - A_t(\lambda)$ спектры пластины и слоя на пластине

Авторы попытались аналитически [12] оценить первые приближения оптических характеристик слоя $n_f(\lambda)$ и $k_f(\lambda)$ (рис. 2, кривые 1) по спектрам $T_+(\lambda)$ и $T_-(\lambda)$, которые огибают экстремумы спектра слоя $T_t(\lambda)$ на неограниченной подложке К8. Такой спектр рассчитывался по формулам из работы [7] на основании спектров $T_t(\lambda)$, $R_t(\lambda)$ и $R_{bt}(\lambda)$. Затем по спектрам $T_t(\lambda)$, $R_t(\lambda)$, которые измерены при двух углах и двух поляризациях световых волн. На основании этих приближений в формулах из работы [9] численно определялись три параметра слоя – $n_f(\lambda)$, $k_f(\lambda)$ (рис. 2, кривые 2) и h_f . Толщина слоя оказалась равной 353,3нм. Невязка измеренных и рассчитанных спектров (рис. 1) составляет 0,03. Таким же образом определялись параметры $n_f(\lambda)$, $k_f(\lambda)$ и h_f по формулам из работы [7]. Не-

вязка между измеренными и рассчитанными спектрами в этом случае 0,041.

По спектрам (400 нм $\leq \lambda \leq 1000$ нм) эллипсометрических параметров, измеренным на спектральном эллипсометре Horiba UVISEL при угле падения 70°, были рассчитаны (формула Adachi-New Forouhi) оптические характеристики ZnO:Al (кривые 3, рис. 2) и толщина слоя равна 278,8 нм. Поверхностный слой включает (модель Бруггемана) 26,5 % ZnO:Al и 73,5 % воздуха. Его толщина – 7 нм.

Спектры эллипсометрических углов $\tan \psi(\lambda)$) и $\cos \Delta(\lambda)$ (рис. 3, кривые 1) структуры слой ZnO:Al – стеклянная пластина измеряли на спектральном эллипсометре ES-2 (ФГУП СКБ ИРЭ РАН, Россия) [11, 12] в диапазоне длин волн 400 нм $\leq \lambda \leq 1000$ нм при угле падения 65°. Расчеты спектров $\tan \psi(\lambda)$ и $\cos \Delta(\lambda)$ выполнены по спектрам $n_f(\lambda)$ и $k_f(\lambda)$ (кривые 2, рис. 2) по программе, описанной в работе [9]. Результаты расчетов представлены сплошными кривыми 2 на рис. 3. На рис. 3, а (кривая 3) представлен спектр $[R_{TM}(\lambda)R_{TE}^{-1}(\lambda)]^{0.5}$, рассчитанный по формулам из работы [8].



Рис. 2. Оптические характеристики слоя ZnO:Al



Рис. 3. Спектры эллипсометрических угловZnO:Al

Полученные данные показывают, что оптические характеристики слоя ZnO:Al, определенные численно методом спектрофотометрии (кривые 2, рис. 2), обеспечивают удовлетворительное соответствие в двух оптических методах измеренных и рассчитанных спектров (рис. 1 и рис. 3). Дисперсионная модель Adachi-New Forouhi не учитывает особенности структуры реального слоя ZnO:Al.

Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника, опто- и микроэлектроника 1.3.03» (2016–2017гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marvin J. Weber. Handbook of optical materials. California, 2003. – 499p.

2. A comprehensive review of ZnO materials and devices / Ü. Özgür [et. al.] // JAP. – 2005. – Vol. 98.–P. 041301-1– 041301-103.

3. **Уханов, Ю. И.** Оптические свойства полупроводников / Ю. И. Уханов. – М. : Наука, 1977. – 368 с.

4. **Борн, М.** Основы оптики : пер. с англ. / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 856 с.

5. http://dx.doi.org/10.5012/bkcs.2012.33.4.1235

6. Juan-Maria Gonzalez-Leal, Rafael Prieto-Alcon, Jose -Andres Angel, Dorian A. Minkov, Emilio Marquez. Influence of substrate absorption on the optical andge-ometrical characterization of thin dielectric films // Applied Optics. – 2002. – Vol. 41. – N 34. – P. 7300–7308.

7. **Minkov, D.** Computation of the optical constants of a thin dielectric layer on a transmitting substrate from the reflection spectrum it inclined incidence of light / D. Minkov // JOSA A. -1991. - Vol. 8. - N 2. - P. 306-310.

8. **Penzkofer, A.** Optical constants measurement of single-layer thin films on transparent substrates / A. Penzkofer, E. Drotleff, W. Holzer // Optics Communications – 1998. – V. 158. – P. 221–230.

9. Разработка программного обеспечения для расчета спектров отражения и пропускания интерференционных покрытий на подложках конечной толщины : отчет по НИР / Могилев. гос. ун-т ; рук. Н. И. Стаськов. – Могилев, 2011. – 71 с. – № ГР 20113127.

10. http://www.horiba.com/scientific/products/ellipsometers/spectroscopic-ellipsometers/uvisel/uvisel-spectroscopic-ellipsometer-covering-a-range-from-fuv-to-nir-640/

11. Antohel, S. Romanian Reports in Physics. / S. Antohel, L. Ionl, M. Girtan, O. Tomal // - 2013 - V. 65 - No. 3 - P. 805-811.

12. Коновалов, О. П. Определение оптических констант слабо поглощающих диэлектрических слоев на прозрачной подложке / О. П. Коновалов, И. И. Шаганов // ОМП. – 1988. – № 8. – С. 39–41.

E-mail: <u>ni_staskov@mail.ru</u> <u>iivashkevich@yandex.by</u> <u>mikheev_msu@mail.ru</u>

УДК 620.179.14 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МЕХАНИЧЕСКИХ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ БЕЗ ПРОВЕДЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ

А. Н. СТАШКОВ, А. П. НИЧИПУРУК, В. Г. КУЛЕЕВ, Т. П. ЦАРЬКОВА ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН» Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

DETERMINATION OF MECHANICAL COMPRESSION STRAIN IN LOW-CARBON STEEL SAMPLES USING THE MAGNETIC PARAMETERS WITHOUT PRELIMINARY CALIBRATION A. N. STASHKOV, A. P. NICHIPURUK, V. G. KULEEV, T. P. TSAR'KOVA

Аннотация

В работе измерены зависимости изменений обратимой намагниченности от внутреннего поля при одновременном воздействии на образец двух магнитных полей – квазистатического намагничивающего и переменного подмагничивающего. Установлено, что в пластически деформированных растяжением и упруго сжатых образцах из низкоуглеродистых сталей вид зависимостей резко изменяется по сравнению с зависимостями, полученными на исходных недеформированных образцах – вместо одного максимума появляется три максимума или один максимум и два перегиба. На основе экспериментальных данных предложен алгоритм расчета значений средних механических напряжений в образце. Проведено сравнение рассчитанных значений напряжений с действующими напряжениями при упругом сжатии.

Ключевые слова:

механические напряжения сжатия, магнитная анизотропия, намагничивающее поле, подмагничивающее поле, обратимая намагниченность.

Abstract

The dependences of reversible magnetization from the internal field upon condition action of two magnetic fields (quasi-static and variable) were measured in this work. It has been found that for plastically deformed and elastic compression of lowcarbon steel samples the curves shape were absolutely different comparably with curves shape obtained on undeformed samples - instead of one maximum has been obtained three maxima or one maximum and two bends. There was offered the algorithm of calculation the average mechanical stresses in a samples on the basis of experimental data. The calculated values of the stresses were compared with the acting stresses under elastic compression.

Key words:

mechanical stresses of compression, magnetic anisotropy, magnetizing field, variable magnetic field, reversible magnetization. В настоящее время для контроля механических напряжений применяется ряд методов, в том числе неразрушающих [1]. Из неразрушающих методов для контроля напряжений в стальных изделиях и конструкциях наиболее распространены на практике ультразвуковые, магнитные и рентгеновские. Однако для применения всех известных методов неразрушающего контроля (НК) необходима предварительная калибровка аппаратуры на стандартных образцах в лабораторных или цеховых условиях, что является трудоемкой и дорогостоящей задачей. К тому же далеко не всегда после калибровки удается получить удовлетворительные результаты при измерениях на реальных объектах. Поэтому цель данной работы заключалась в разработке методики НК механических сжимающих напряжений в низкоуглеродистых сталях без проведения предварительного нахождения корреляционных связей между магнитными параметрами и механическими напряжениями, т. е. без предварительной калибровки.

В работе [2] на проволочных образцах из низкоуглеродистой стали Ст1кп были впервые проведены эксперименты по определению магнитного параметра, связанного с полем наведенной магнитной анизотропии и позволяющего экспериментально оценить уровень остаточных напряжений в пластически деформированных проволоках. В эксперименте на образец одновременно действовали два внешних магнитных поля – квазистатическое намагничивающее и, ортогональное ему, переменное подмагничивающее.

Намагничивающим полем, создаваемым соленоидом, проводилось медленное перемагничивание образца по предельной петле гистерезиса. Переменное поле создавалось путем пропускания переменного тока через проволочный образец. С помощью дифференциальной катушки, размещенной в центральной части испытуемого образца, измерялся сигнал, пропорциональный обратимой намагниченности проволоки. На рис. 1 приведены полевые зависимости сигнала измерительной катушки для двух образцов: недеформированного и пластически деформированного растяжением (образец с относительным удлинением $\Delta l/l = 15$ %).

б)



a)

Рис. 1. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки для недеформированного образца (а) и образца с относительным удлинением $\Delta l/l=15$ % (б). Перемагничивание проводилось от $+H_{max}$ до $-H_{max}$

Для недеформированного образца характерно наличие одного максимума вблизи нулевого поля (рис. 1, а), а для пластически деформированного – трех максимумов (рис. 1, б). Такое поведение кривых объясняется следующим образом. После пластической деформации растяжением в проволоке возникают остаточные сжимающие макронапряжения, которые формируют магнитную текстуру типа легкая плоскость (ЛП) [3], поверхность которой перпендикулярна оси предварительного растяжения. Наличие магнитной текстуры типа ЛП влияет на перемагничивание образца. На рис. 2 для наглядности изображена схема необратимых изменений намагниченности в пластически деформированных образцах при изменении поляризующего поля от +H_{max} до -H_{max} и наличии в образце магнитной текстуры типа ЛП. При уменьшении поляризующего поля от +H_{max} до 0 происходит необратимое изменение намагниченности, вызванное наличием в материале текстуры, созданной остаточными сжимающими напряжениями (необратимое смещение 90-градусных доменных границ, схематически изображенных на рис. 2, б). При изменении знака поля происходит необранамагниченности, тимое изменение связанное co смещением 180-градусных доменных границ (рис. 2, в). Данное изменение намагниченности никак не связано с остаточными напряжениями, поскольку угол между магнитными моментами и легкой плоскостью не изменяется. При уменьшении намагничивающего поля до -H_{max} происходит необратимое изменение намагниченности с поворотом векторов на 90[°] (рис. 2, г), при этом главную роль играет ЛП. В соответствии с тем, что максимум обратимых изменений намагниченности, сигнал от которых фиксируется измерительной катушкой, возникает при необратимых скачках доменных границ, и наблюдаются три максимума (рис. 1, б).



B)

г)

б)

a)

Рис. 2. Схематическое расположение векторов намагниченности (без учета процессов вращения) в разных намагничивающих полях H: $a - H = +H_{max}$; $6 - 0 < H < H_{\sigma}$; $B - 0 < |H| < H_{\sigma}$; $\Gamma - H = -H_{max}$

Поля, в которых должны находиться левый и правый максимумы, можно оценить из соотношения магнитоупругой и магнитостатической энергий для конкретного зерна, испытывающего сжимающие напряжения, с углом θ_0 между направлением поля и ближайшей легкой осью данного зерна.

Выражение для полной энергии с учетом пренебрежения процессами вращения магнитных моментов можно представить следующим образом:

$$E = -H \quad {}_{s} \left[\cos \theta_{0} \right] - \frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma_{i} \left[\cos^{2} \theta_{0} - \frac{1}{3} \right], \tag{1}$$

где M_s – намагниченность насыщения; λ_{100} – константа магнитострикции в направлении (100); σ_i – средние механические напряжения.

Введем величину эффективного поля H_{σ} :

$$H_{\sigma} = 1, 5 \cdot \lambda_{100} \cdot \sigma_i / M_s \,. \tag{2}$$

Угол θ_0 для левого максимума изменяется из диапазона 90–135⁰ на +90⁰, для правого – из диапазона 0–(-55⁰) в угол 45–90⁰). Условием необратимого изменения намагниченности является равенство разности начальной и конечной энергий величине потенциального барьера доменной границы (H_{кр}). Далее определяется разность энергий начального и конечного состояния для левого и правого максимума, нормируется на намагниченность насыщения, усредняется по θ_0 в указанных выше интервалах углов. В итоге выражение для поля правого максимума имеет вид:

$$H_{np}^{max} = 0.91 \cdot H_{\sigma} - 1.89 \cdot H_{\kappa p}.$$
 (3)

Для поля левого максимума получается аналогичное выражение:

$$\left| \mathbf{H}_{\pi}^{\max} \right| = 0.82 \cdot \mathbf{H}_{\sigma} + 1.89 \cdot \mathbf{H}_{\kappa p}.$$

$$\tag{4}$$

Из выражений (3) и (4) следует, что среднее арифметическое полей H_{np}^{max} и H_{n}^{max} равно 0,87 H_{σ} . Таким образом, экспериментально определив поля максимумов H_{np}^{max} и H_{n}^{max} , возможно найти значение эффективного поля H_{σ} и из формулы (2) найти значение средних механических напряжений σ_i в образце (табл. 1).

Δl/l, %	2	4	10	15	23
σ _i , MΠa	46,3	142,7	162,2	201,2	162,2

Табл. 1. Значения средних механических напряжений в образце

Намагничивающее и переменное подмагничивающее поля могут быть не ортогональны друг другу. Способы создания подмагничивающего поля также могут быть различны. В подтверждение этого утверждения авторами были проведены эксперименты, в которых образец из стали Ст3 длиной 250 мм и сечением 6 мм² помещался в соленоид. В средней части образца

располагались две катушки. С помощью одной из катушек возбуждалось переменное магнитное поле, параллельное намагничивающему полю соленоида, а с помощью второй проводилось измерение сигнала. Во время измерений образец подвергался упругому сжатию. Результаты представлены на рис. 3.



Рис. 3. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки, полученные на образце из Ст3: 1 – кривая без нагрузки; 2 – кривая, полученная на упруго сжатом образце (напряжения 98,1 МПа); 3 – кривая, полученная на упруго сжатом образце (напряжения 196,2 МПа). Перемагничивание проводилось от +H_{max} до -H_{max}

Из рис. З видно, что при возникновении сжимающих напряжений в образце на кривых 2 и З возникают перегибы в положительном и отрицательном полях. Чтобы определить поля левого и правого максимумов, была применена математическая обработка экспериментальных данных с помощью функций псевдо-Фойгта (pseudo-Voigt), широко применяемых для обработки спектральных данных. Для этого исходную кривую разложили на 3 кривых с единственными максимумами и определили поля этих максимумов. Результаты аппроксимации и нахождения величин расчетных механических напряжений $\sigma_i^{pacч}$, а также сравнение с действующими σ_i приведены в табл. 2.

Табл. 2. Расчётные механические напряжения в образце и их сравнение с действующими напряжениями

σ _i , ΜΠa	σ_i^{pacy} , M Πa	$\Delta \sigma / \sigma_i^{pacy}, \%$
98,1	91,2	7
196,2	184,9	5,8

Как видно из табл. 2, относительная разность между действующими и экспериментально определенными напряжениями не превышает 7 %.

Для практического применения методики экспериментального определения механических сжимающих напряжений в массивных конструкциях из низкоуглеродистых сталей в качестве намагничивающего устройства целесообразно применять П-образные электромагниты, а для возбуждения подмагничивающего переменного поля и измерения полезного сигнала возможно использовать накладной вихретоковый преобразователь, размещенный в межполюсном пространстве электромагнита.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Диагностика», № г.р. 01201463329) при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-58-00027 Бел а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gary, S. Practical residual stress measurement methods / Gary S. Schajer. Vancouver, Canada: John Wiley & Sons Ltd. – 2013. – P. 310.

2. Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволоках из низкоуглеродистой стали / А. П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – №10. – С. 18–26.

3. Возможности магнитного контроля предшествующих разрыву пластических деформаций в конструкциях из низкоуглеродистых сталей / А. П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 9. – С. 31–38.

E-mail: stashkov@imp.uran.ru

УДК620.179.14 ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА СТАЛИ 40 ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА

А. С. СЧАСТНЫЙ, А. А. ОСИПОВ, В. А. БУРАК

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620.179.14 EVALUATING RELATION OF ANNEALING TEMPERATURE TO STEEL 40 ROLLING SHEETS ANISOTROPIC PROPERTIES A. S. SCHASTNY, A. A. OSIPOV, V. A. BURAK

Аннотация

Исследовано влияние температуры отжига холоднокатаной листовой стали 40 на градиент напряженности поля остаточной намагниченности. Установлено, что при повышении температуры отжига влияние анизотропии листового проката на магнитные и механические свойства снижается.

Ключевые слова:

остаточная намагниченность, анизотропия, холоднокатаная сталь, импульсный магнитный метод контроля, градиент поля остаточной намагниченности, термообработка.

Abstract

The influence of the annealing temperature of cold-rolled steel 40 to gradient of the residual magnetization field is investigated. It is determined that the anisotropy effect to sheet metal magnetic and mechanical properties is reduced if the annealing temperature increases.

Key words:

Residual magnetization, anisotropy, cold-rolled steel, pulsed magnetic testing method, gradient of the residual magnetization field, heat treatment.

Надежность и долговечность конструкций, сооружений, машин и механизмов существенно зависят от качества используемых материалов и изделий. Среди материалов, применяющихся в машиностроении, большой удельный вес составляют изделия, полученные методом штамповки или профилирования из листового проката сталей.

Анизотропия механических свойств листового проката сталей формируется в процессе его производства. Влияние анизотропии на качество таких технологических операций, как резка, штамповка и т. д. неоднозначно и зависит от ряда факторов. Учет анизотропии позволяет повысить как качество изготавливаемой продукции, так и экономичность и технологичность производства. Для контроля механической анизотропии стального проката могут быть применены магнитные методы [1], основой для использования которых является связь магнитных параметров со структурным состоянием материала. Величину анизотропии оценивают по разнице магнитных информативных параметров, измеренных вдоль и поперек направления прокатки.

Исследования влияния температуры термообработки на магнитную анизотропию стального проката проводились на двух комплектах образцов холоднокатаной конструкционной углеродистой стали 40 размером 185 x 185 x 3 мм. Образцы были подвергнуты отжигу при температурах 200, 400, 500, 530, 560, 600, 650, 700, 730, 760, 800 и 900 °C. Из комплектов были изъяты и в исследованиях не участвовали образцы, имеющие механические повреждения, таких образцов было всего четыре: образцы, отожженные при температурах 800 и 900 °C, в первом комплекте и образцы, отожженные при 700 и 730 °C, во втором комплекте.

Предварительно на всех отобранных для исследований образцах листового проката стали 40 был измерен градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности стандартным феррозондом-градиентометром приборов типа ИМА после намагничивания импульсным магнитным полем амплитудой 250 кА/м. На рис.1 представлены графики зависимостей измеренных градиентов ∇H_r от температуры отжига для каждого комплекта образцов листового проката и их усредненное значение. Как видно из графиков, величина градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности с увеличением температуры отжига уменьшается на всем протяжении исследуемого диапазона температур, что характерно для углеродистых конструкционных сталей, к которым относится и исследуемая сталь 40. Кроме того, из представленных на рис. 1 зависимостей видно, что разница между градиентами, измеренными на двух образцах, отожженных при одной температуре, может составлять до 10 %, из чего можно сделать вывод, что комплекты формировались из листового проката различных партий, поэтому в дальнейшем каждый комплект образцов холоднокатаной стали 40 будет рассматриваться по отдельности.



Рис. 1. Зависимости градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных прибором ИМА, от температуры отжига холоднокатаной стали 40: ○ – комплект образцов № 1;• – комплект образцов № 2

Намагничивание образцов холоднокатаной стали 40 осуществлялось импульсами магнитного поля амплитудой 205 кА/м с помощью блока прибора ИМА-5Б [2], а система соленоидов представляла собой две прямоугольные катушки (внешние размеры 210 х 55 х 50 мм), оси которых располагались нормально к поверхности листа, расстояние между осями составляло 114 мм. Измерение градиента остаточной намагниченности проводилось градиентометром с параллельным расположением полузондов [3], намагничивающие катушки были включены так, чтобы их вектора напряженности поля H в плоскости листа были направлены в одну сторону (рис. 2).



Рис. 2. Расположение измерительных полузондов (1) градиентометра с параллельным расположением полузондов относительно намагничивающих катушек (2) и образца (3): а – измерение градиента нормальной ∇H_m составляющей напряженности поля остаточной намагниченности; б – измерение градиента тангенциальной ∇H_{τ} составляющей напряженности поля остаточной намагниченности поля остаточной намагниченности

На рис. 3 представлено изменение величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных датчиком с параллельным расположением полузондов вдоль и поперек направления прокатки, для обоих рассмотренных комплектов холоднокатаной стали 40 отдельно. Как видно из представленных зависимостей, для первого комплекта образцов (рис. 3, а) характерно практически полное отсутствие магнитной анизотропии, разница между значениями величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, практически отсутствует во всем диапазоне изменения температуры отжига (относительная разница около 5 %), за исключением значений, измеренных на образце, отожженном при самой высокой для данного комплекта температуре. На образцах из комплекта № 1 также прослеживается неоднозначный ход зависимости измеренных значений градиентов поля остаточной намагниченности от температуры термообработки: при отсутствии отжига или его невысокой температуре (до 530 °C) величины градиентов поля остаточной намагниченности практически не изменяются. При дальнейшем повышении температуры отжига, когда начинаются структурные превращения в металле, однозначной тенденции в ходе зависимости не наблюдается.

Результаты исследований, проведенные на втором комплекте образцов, представлены на рис. 3, б и характеризуются показательными изменениями в структуре холоднокатаной стали 40 при отжиге при разных температурах. Так, величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренного как вдоль, так и поперек направления прокатки, уменьшаются с увеличением температуры отжига. Из общей тенденции выбивается лишь образец, подвергнутый отжигу при 800 °C, что можно объяснить его механическими повреждениями (царапины, неровность поверхности и т. п., оказывающими влияние на точность измерения). Анизотропия магнитных свойств, характеризуемая разницей между величинами градиента, измеренными вдоль и поперек направления прокатки, наблюдается при отсутствии термообработки или невысоких, до 500 °C, температурах отжига. Так, относительная разница между градиентами, измеренными вдоль и поперек направления прокатки, составляет около 12 %, а после отжига при температурах свыше 500 °С не превышает 5 %, то есть при термообработке анизотропия свойств исчезает, так как происходит выравнивание структуры стали и устранение неоднородностей.



Рис. 3. Зависимости градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отжига холоднокатаной стали 40: а – комплект образцов № 1; б – комплект образцов № 2; ○ – вдоль направления прокатки; • – поперек направления прокатки

Для величин градиента тангенциальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных датчиком с параллельным расположением полузондов вдоль и поперек направления прокатки, представленных на рис. 4, для каждого рассматриваемого комплекта образцов наблюдаются те же зависимости от температуры отжига, что и для величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности. Несколько изменилась лишь величина измеренных значений градиентов поля остаточной намагниченности – в среднем величины градиентов тангенциальной составляющей на 20 % ниже величин градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности.



Рис. 4. Зависимости градиента тангенциальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отжига холоднокатаной стали 40: а – комплект образцов № 1; б – комплект образцов № 2; о– вдоль направления прокатки; •– поперек направления прокатки

Таким образом, на основании проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что отжиг при температуре свыше 500 °C холоднокатаной стали 40, обладающей анизотропией магнитных и, соответственно, механических свойств при отсутствии термообработки, выравнивает структуру стали и устраняет ее неоднородность, что приводит к уменьшению влияния направления прокатки на магнитные и механические свойства.

Работа выполнялась при поддержке БРФФИ и РФФИ договор № T16P-040.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щербинин, В. Е.** Магнитный контроль качества металлов / В. Е. Щербинин, Э. С. Горкунов. – Екатеринбург, 1996. – 266 с.

2. Мельгуй, М. А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б / М. А. Мельгуй [и др.] // Научно технические достижения. – 1990. – № 4. – С. 41–44.

3. Счастный, А. С. Исследование возможности использования приборов магнитного контроля для оценки механической анизотропии листового проката / А. С. Счастный, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 54–66.

E-mail: <u>veronika.burak@gmail.com</u> <u>sasikv@gmail.com</u> osipov@iaph.bas-net.by

УДК 535.5 + 621.658.011 :620.1

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ НЕОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК, А. Н. ВАСИЛЕНКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 535.5 + 621.658.011 :620.1 POLARIZATION INTERFEROMETRY OF INHOMOGENEOUS ANISOTROPIC OPTICAL MATERIALS A. V. KHOMCHENKO, I. U. PRIMAK, A. N. VASILENKO

Аннотация

Продемонстрирована возможность измерения распределения двулучепреломления в неоднородных анизотропных средах методом поляризационной интерферометрии. Исследованы возможности и границы применения метода при анализе распределения величины механических напряжений в плоскости закаленного стекла.

Ключевые слова:

закаленные стекла, поляриметрия, поляризационная интерферометрия, метод измерения, остаточные напряжения, распределение двулучепреломления.

Abstract

The possibility of measuring the birefringence distribution in inhomogeneous anisotropic materials by the polarization interferometry technique is demonstrated. The possibilities and application limits of the technique for measuring of the mechanical stresses distribution in the plane of the tempered glass are investigated.

Key words:

polarimetry, polarization interferometry, measurement technique, birefringence distribution, scattered light, tempered glass.

Введение

Широкое применение закаленного стекла в технике и строительстве стимулирует исследования напряженных состояний в стекле и конструкциях на его основе, о чем свидетельствует существование ряда методов и технологий, используемых для их контроля. Механические и оптические характеристики такого стекла определяются характером и режимами закалки, поэтому измерение механических напряжений является способом контроля не только качества изделий, но и процесса их изготовления. Стекло, при наличии в нем механических напряжений, становится анизотропным, и измерения интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец, позволяют оценить двулучепреломление в таких объектах. С этой точки зрения методы поляриметрии, основанные на

эффекте фотоупругости, представляют определенный интерес для исследования напряжений. При этом следует отметить, что измеряя распределение интенсивности света можно анализировать и оценивать двулучепреломление в отдельной точке или небольшой области стекла, но достаточно сложно это выполнить для протяженных анизотропных объектов. Отсутствие эффективных способов измерения остаточных напряжений осложняет управление процессами производства закаленного стекла. В то же время для оптимизации процессов закалки стекла и разработки соответствующего оборудования необходим анализ распределения внутренних механических напряжений во всем объеме контролируемого объекта.

Настоящая работа является развитием исследований, посвященных анализу распределения остаточных напряжений в протяженных анизотропных прозрачных объектах.

Поляризационно-оптический метод, предложенный в [1], позволяет визуализировать поля напряжений в большой области анализируемого объекта. Принципиальная схема установки, используемой для регистрации поляризационных интерферограмм, представлена на рис. 1. Линейно поляризованный свет, проходя через неоднородную анизотропную среду 5, изменяет состояние поляризации в каждой точке плоскости (x, y) в разной степени. После этого пучок, прошедший через образец, анализатор 6, скрещенный с поляризатором 4, попадает в фоторегистрирующее устройство 9, подключенное к компьютеру 10.



Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник света; 2, 7 – светофильтры; 3, 8 – объективы; 4 – поляризатор; 5 – контролируемое стекло; 6 – анализатор; 9 – фоторегистрирующее устройство; 10 – компьютер; 11 – система поворота

Регистрируемая интенсивность света (рис. 2) является функцией двух координат и определяется как:

$$I(x, y) = I_p T(\cos^2 \chi - \sin 2\alpha \cdot \sin(2(\alpha - \chi)) \sin^2 \frac{\delta}{2}, \qquad (1)$$

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



Рис. 2. Регистрируемая интенсивность света прошедшая через исследуемое стекло

Обрабатывая регистрируемые распределения интенсивности I(x, y), можно восстановить разность фаз δ в каждой точке стекла и, учитывая ее взаимосвязь с напряжением, воспроизвести поле напряжений. Для определения δ на первом этапе проводятся измерения интенсивности при некотором фиксированном (но произвольном) угле α и $\chi = 90^{\circ}$:

$$I(x, y) = I_{\perp}^{(1)} = I_p T_1 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2},$$
 (2)

где $T_1 = T(\alpha, \chi = 90^\circ)$. Затем размещаем анализатор 6, так что $\chi = 0^\circ$, и получаем

$$I(x, y) = I_{\parallel}^{(1)} = I_p T_1 (1 - \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}).$$
 (3)

Далее поворачиваем поляризатор 4 на угол, равный 45°, (т. е. имеем α +45°), а анализатор располагаем под углом χ = 90°, при этом интенсивность определяется как

$$I(x, y) = I_{\perp}^{(2)} = I_p T_2 \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}, \qquad (4)$$

где $T_2 = T(\alpha + 45^\circ, \chi = 90^\circ).$

На последнем этапе измерение распределения интенсивности осуществляем при ориентации поляризатора относительно исследуемого образца под углами $\alpha + 45^{\circ}$ и $\chi = 0^{\circ}$, тогда

$$I(x, y) = I_{\parallel}^{(2)} = I_p T_2 (1 - \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}).$$
 (5)

Распределение разности фаз $\delta(x, y)$ можно получить, обработав зарегистрированные распределения интенсивности
$$\delta = 2 \left\{ \arcsin\left(\pm \sqrt{\frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}}} \right) + m\pi \right\}, \quad m \in \mathbb{Z} .$$
 (6)

Можно показать, что разность фаз

$$\delta(x,y) = (kC/\cos 2\alpha) \int_{-d/2}^{d/2} (\sigma_X(x,y,z) - \sigma_Y(x,y,z)) dz, \qquad (7)$$

где *С*-относительный оптический коэффициент напряжения; σ_X и σ_Y напряжения нормальные плоскостям OYZ и OXZ соответственно; *d* – толщина стекла.

На практике распределение напряжений по толщине стекла описывают функцией вида [2]

$$\sigma = \sigma_u (1 - 12(z/d)^2) \tag{8}$$

где d – толщина стекла; σ_u – напряжение при z = 0 (центральное напряжение растяжения).

Учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжениями можно воспроизвести поле механических напряжений. Для нахождения значения напряжений в центре поперечного сечения образца и определения зависимостей σ_x и σ_y от координат были выполнены измерения рассеянного излучения в процессе сканирования образца узким пучком в поперечном сечении стекла по его толщине.

Регистрация рассеянного света для измерения профиля механических напряжений

Оценка поверхностных напряжений требует предварительного измерения центрального напряжения, что возможно, например, на основе анализа рассеяния света на неоднородностях распределения показателя преломления в стекле. Наблюдение такого рассеяния позволяет визуализировать распространение света в анизотропном стекле. При этом, анализируя распределения интенсивности рассеянного света можно практически локально исследовать анизотропию показателя преломления и напряжения в стекле [2]. Рассмотрим процедуру измерения, используемую в этих методах. Схема измерений представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема измерения: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – линза; 4 – исследуемое стекло; 5 – фоторегистрирующее устройство

Линейно поляризованный свет нормально падает на торец стекла 4 и проходит через него. Рассеянный свет регистрируется в плоскости перпендикулярной направлению распространения фоторегистрирующим устройством 6 (фотоприемник или матрица фотоприемников). Известно, что интенсивность рассеянного света определяется как

$$I(z,x) = I_0 \cos^2(0,5k_0 C\sigma(z)x),$$
(9)

если направление наблюдения рассеянного света перпендикулярно направлению поляризации падающего на стекло света. Здесь I_0 – некоторая постоянная; k_0 – волновое число вакуума; С – константа фотоупругости; $\sigma(z)$ – функция, описывающая распределение напряжения в стекле. Анализ регистрируемых зависимостей I(z,x) построенных при сканировании пучком света параллельно оси 0z, позволяет получать оценки зависимостей напряжений $\sigma(z)$. Такое определение возможно, если проанализировать рассеяние света в случае его распространения вдоль оси образца (т. е. при z = 0, см. рис. 4).



Рис. 4. Изменение распределения интенсивности рассеянного света вдоль образца при его сканировании в поперечном сечении (в направлении OZ)

Здесь следует отметить, что вследствие того, что обыкновенная и необыкновенная волны имеют различные фазовые скорости в анизотропном материале с двулучепреломлением, между ними возникает фазовая задержка. Интерференция между обыкновенной и необыкновенной волнами изменяет состояние поляризации вдоль распространения света в образце. Пространственная модуляция рассеянного света заметна в направлении, перпендикулярном направлению распространения зондирующего излучения в анизотропном образце. При этом набег фаз $\delta = \pi$ возникает на длине х, равной периоду регулярного распределения интенсивности рассеянного света (см. рис. 4), что позволяет определить число *m* в выражении (6) и уйти от неоднозначности определения разности фаз в анализируемом образце.

Оценка σ_{u} получается на основе метода наименьших квадратов, в котором минимизируется сумма квадратов невязок

$$S(A_0, A_1, \sigma_u) = \sum_{i=1}^n \left(I_i^{e} - I^t(x_i, A_0, A_1, \sigma_u) \right)^2, \qquad (10)$$

где I_i^e – измеренное значение интенсивности рассеянного света для координаты x_i ($i = \overline{1, n}$), I^t – теоретическая модель рассеяния света, которая с учетом (9) запишется как:

$$I^{t}(x_{i}, A_{0}, A_{1}, \sigma_{u}) = A_{1} + 0.5A_{0}\cos(k_{0}\sigma_{u}Cx_{i}).$$
(11)

Учитывая (11), оценки A₁ и T можно получить с помощью формул:

$$A_{1} = (0, 5\pi / L) \sum_{i=0}^{n} I_{i}^{e} \sin(\pi x_{i} / L) \Delta x_{i} ;$$

$$T = \pi L / (arc \cos F + 2m\pi), F = \frac{\sum_{i=0}^{n} I_{i}^{e} \Delta x_{i} - 0, 5\pi \sum_{i=0}^{n} I_{i}^{e} \sin(\pi x_{i} / L) \Delta x_{i}}{2\sum_{i=0}^{n/2} I_{i}^{e} \Delta x_{i} - 0, 5\pi \sum_{i=0}^{n} I_{i}^{e} \sin(\pi x_{i} / L) \Delta x_{i}}$$

В этих моделях A_1 описывает некоторую постоянную составляющую. На рис. 5 представлены результаты исследования рассеяния света с длиной волны 0,533 мкм, образцом стекла толщиной 6 мм, ширина и длина которого соответственно равны 100 и 140 мм, интенсивность рассеянного света I(0,x) приведена в относительных единицах. Обработка полученной экспериментально зависимости I(x) с использованием (9) дала оценку $\sigma_u = 40,2$ МПа



Рис. 5. Зависимость I(x) для z = 0

Таким образом, метод поляризационной интерферометрии, основанный на компьютерной обработке поляризационной интерферограммы, полученной в результате наложения двух распределений интенсивности света, зарегистрированных при определенных условиях и формируемых при интерференции поляризованного излучения, прошедшего через анализируемый неоднородный анизотропный образец, позволяет выявлять и фиксировать изменения в характеристиках анализируемого объекта с высокой точностью и чувствительностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомченко, А. В. Измерение распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в твердых телах с внутренними напряжениями / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2016. – Т. 96, № 3. – С. 124–130.

2. Hödemann, S. Scattered laser light fringe patterns for stress profile measurement in tempered glass plates / S. Hödemann [et. al.] // European Journal Glass Scientific Technology, A. – 2014. – Vol. 55, N_{2} 3, – P. 90–95.

Email: avkh@mogilev.by

УДК 535.31 + 621.658.011 ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕКЛЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАССЕЯННОГО СВЕТА

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК, А. Н. ВАСИЛЕНКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDS 535.31 + 621.658.011 ESTIMATION OF RESIDUAL STRESSES IN TEMPERED GLASS FROM THE ANALYSIS OF THE SCATTERED LASER LIGHT A. V. KHOMCHENKO, I. U. PRIMAK, A. N. VASILENKO

Аннотация

На основе анализа распределения интенсивности рассеянного света предложен метод оценки напряжений в закаленном стекле. Исследовано ассиметричное распределение механических напряжений в поперечном сечении образца и сделаны оценки значений центральных напряжений.

Ключевые слова:

остаточные напряжения, анизотропия показателя преломления, рассеяние света.

Abstract

By analyzing the distribution of the scattered light intensity is provided a technique of assessing the stress in tempered glass. The asymmetric distribution of mechanical stresses in the cross section of the sample is investigated and estimates of the values of the central stresses are made.

Key words:

polarimetry, measurement technique, birefringence distribution, scattered light, tempered glass.

Широкое применение закаленного стекла в машиностроении и строительстве стимулирует исследования напряженных состояний в стекле и конструкциях на его основе, о чем свидетельствует существование ряда методов и технологий, используемых для их детектирования [1–4]. В качестве примера можно привести такие достаточно эффективные неразрушающие методы измерения, как тензометрический метод, методы голографической интерферометрии и цифровой спекл-интерферометрии. Определенный интерес составляют методы оптической поляриметрии. Очевидно, что каждый из этих методов имеет свою область применения и предел чувствительности. Так как механические и оптические характеристики закаленного стекла определяются характером и режимами закалки, то измерение механических напряжений является способом контроля не только качества изделий, но и процесса их изготовления. Отсутствие эффективных способов измерения остаточных напряжений осложняет управление процессами производства закаленного стекла. Поляризационно-оптический метод, предложенный в [4], позволяет визуализировать поля напряжений в большой области анализируемого объекта. Оценка поверхностных напряжений требует предварительного измерения центрального напряжения, что возможно, например, на основе анализа рассеяния света на неоднородностях распределения показателя преломления в стекле. Наблюдение такого рассеяния позволяет визуализировать распространение света в анизотропном стекле. Более того, анализ распределения интенсивности рассеянного света позволяет локально исследовать анизотропию показателя преломления и напряжения в стекле [2, 3], оценивая их распределение в поперечном сечении образца.

В настоящей работе рассмотрен подход, основанный на анализе зарегистрированного распределения интенсивности рассеянного света и примененный для исследования распределения механических напряжений в поперечном сечении закаленного стекла. Схема, позволяющая регистрировать распределение рассеянного света, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема измерения: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – линза; 4 – регистрируемое излучение; 5 – фоторегистрирующее устройство; 6 – исследуемый объект; 7 – фильтр; 8 – направление ориентации плоскости поляризации излучения, прошедшего через поляризатор

Линейно поляризованный свет от источника 1 нормально падает на торец стекла 7 и распространяется в нем. Рассеянный свет регистрируется в плоскости перпендикулярной направлению распространения фоторегистрирующим устройством 5 (фотоприемник или матрица фотоприемников). Наличие в закаленном стекле флуктуаций показателя преломления малого, по сравнению с длиной волны, зондирующего излучения является причиной рассеяния света. Области таких флуктуаций, имеющие небольшие, по сравнению с длиной волны, излучения, действуют как диполи, рассеивая свет в направлении перпендикулярном направлению их возбуждения световой волной. Вследствие двулучепреломления в анизотропном образце распространяются обыкновенная и необыкновенная волны. Обыкновенная волна поляризована в направлении главных напряжений о_v, а необыкновенная – в направлении главных напряжений σ_x . Эти компоненты технологически выделены как главные значения напряжений, определяющие направления, в которых поляризованы обыкновенная и необыкновенная волны. Вследствие того, что обыкновенная и необыкновенная волны имеют различные фазовые скорости в анизотропном материале с линейным двулучепреломлением, между ними возникает фазовая задержка. Интерференция между обыкновенной и необыкновенной волнами изменяет состояние поляризации вдоль распространения света в образце. Пространственная модуляция рассеянного света заметна в направлении перпендикулярном направлению распространения зондирующего излучения в анизотропном образце.

При этом интенсивность рассеянного света определяется как [3]:

$$I_{\perp}(z,x) = I_0 \cos^2(0,5k_0 C\sigma(z)x),$$
 (1)

где I_0 – некоторая постоянная; k_0 – волновое число в вакууме; С – константа фотоупругости; $\sigma(z)$ – функция, описывающая распределение напряжения в стекле.

Анализ регистрируемых зависимостей $I_{\perp}(z,x)$, построенных при сканировании пучком света параллельно оси 0x позволяет получать оценки зависимостей напряжений $\sigma(z)$. Согласно литературным данным [2, 3] распределение напряжений в стекле по толщине $\sigma(z)$ имеет вид параболы. При этом только в идеальной ситуации это распределение симметрично относительно оси 0y. Поэтому представим распределение напряжений в стекле составной функцией вида:

$$\sigma(z) = \begin{cases} A_1 z^2 + \sigma_0, -0, 5d \le z \le 0, \\ A_2 z^2 + \sigma_0, 0 < z \le 0, 5d, \end{cases}$$
(2)

где $A_{1,}$ и $A_{2,}$ некоторые постоянные; $\sigma_{0} = \sigma(z=0)$ – максимальное значение напряжение растяжения (σ_{0} – центральное напряжение в случае $d_{1} = d_{2} = d/2$); $d = d_{1} + d_{2}$ – толщина листа стекла.

Оценку σ_0 можно получить, если осуществить регистрацию интенсивности рассеянного света $I_{\perp}(0, x)$ фотоприемником 5 (рис. 2).



Рис. 2. Изменение распределения интенсивности рассеянного света вдоль образца (в направлении ОХ, см. рис. 1) при его сканировании в поперечном сечении (в направлении ОZ)

Эта зависимость является периодической и соответствует прямолинейному распространению света в стекле. После определения периода Tфункции $I_{\perp}(0,x)$ максимальное напряжение растяжения вычисляется по формуле

$$\sigma_0 = 2\pi / (k_0 CT).$$

В соответствии с рис. 2 распределение интенсивности при z = 0 имеет период T = 6,1 мм. При этом, оцениваемое значение σ_0 составляет величину ~ 34 МПа.

Значения коэффициентов $A_{1,}$ и $A_{2,}$ можно найти, проанализировав величину отклонения луча при сканировании им параллельно оси 0x (рис. 3). Траектория луча описывается уравнением [5]

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{1}{n(z)} \frac{dn}{dz},$$
(3)

где n(z) и $\frac{dn}{dz}$ – функция и ее производная, описывающие распределение показателя преломления по толщине стекла.



Рис. 3. Зависимость расстояния *x*, на котором достигается отклонение Δz луча от координаты точки ввода зондирующего пучка в образец (а), и отклонения Δz (точки), расстояния x_0 (крестики), на котором достигается это отклонение от координаты точки ввода z_0 зондирующего пучка в образец (б); стекло толщиной 6 мм ($d_1 = 2,6$ мм, $d_2 = 3,4$ мм)

Полагая, что $n(z) \approx n_0$ (n_0 – показатель преломления изотропного стекла),

$$\frac{dn}{dz} = \begin{cases} -2CA_1 z, -0, 5d \le z \le 0, \\ -2CA_2 z, 0 < z \le 0, 5d, \end{cases}$$
(4)

и учитывая граничные условия z(x=0)=0, $z(x=-\infty)=0$ получаем решение уравнения (3). При этом величина отклонения от координаты точки ввода луча в стекло z_0 определяется как:

$$\Delta z = z - z_0 = z_0 \left(\exp\left(\sqrt{-2n_0^{-1}CA_{1,2}}x_0\right) - 1 \right), \tag{5}$$

где x_0 – длина распространения луча, при которой достигается данное отклонение. Учитывая вышесказанное и, что на поверхностях стекла $\sigma_{\Pi 1} = \sigma(-d_1) = A_1 d_1^2 + \sigma_0$ и $\sigma_{\Pi 2} = \sigma(d_2) = A_2 d_2^2 + \sigma_0$, имеем $\sigma_{\Pi 1} = 3,4$ МПа, $\sigma_{\Pi 2} = -318,8$ МПа.

Таким образом, используя предложенный подход, основанный на анализе зарегистрированного распределения интенсивности рассеянного света, можно оценить механические напряжения в закаленном стекле и исследовать ассиметричное распределение механических напряжений в поперечном сечении образца и сделать оценки значения растягивающих и сжимающих напряжений стекла. Представленные результаты исследования оптических свойств закаленных стекол позволяют сделать вывод, что предложенный подход позволяет корректно оценивать распределение величины напряжений в анизотропных неоднородных объектах большой площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомченко, А. В. Измерение распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в твердых телах с внутренними напряжениями / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2016. – Т. 96, № 3, – С. 124–130.

2. **Hödemann, S.** Scattered laser light fringe patterns for stress profile measurement in tempered glass plates / S. Hödemann [et al.] // European Journal Glass Scientific Technology, A. – 2014. – Vol. 55, No 3. - P. 90-95.

3. Gradient scattered light method for non-destructive stress profile determination in chemically strengthened glass / S. Hödemann [et. al.] // Journal Mater Scientific. – 2016. –Vol. 51. – P. 5962–5978.

4. **Хомченко, А. В.** Поляризационная интерферометрия сред с линейным двулучепреломлением / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Прикладная оптика – 2016 : сб. тр. – СПб, 2016. – Т. 2. – С. 213–217.

5. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1973. – 716 с.

E-mail: avkh@mogilev.by

УДК 621.372.8:535 ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОЗДУХА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛНОВОДОВ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

А. В. ШИЛОВ, А. Б. СОТСКИЙ, *Л. И. СОТСКАЯ

УО «Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова» *ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 621.372.8:535 TERAHERTZ SPECTROSCOPY OF AIR WITH THE USE OF HOLLOW-CORE WAVEGUIDES *A. V. SHILOV, A. B. SOTSKY, L. I. SOTSKAYA*

Аннотация

Теоретически исследованы вопросы импульсной терагерцовой спектроскопии воздуха, заполняющего полую сердцевину полимерных капиллярных волноводов кругового сечения с металлизированной внешней границей. На примере восстановления спектра поглощения водяного пара получены оценки точности метода.

Ключевые слова: волновод, мода, терагерцовая импульсная спектроскопия.

Abstract

Problems of the pulse terahertz spectroscopy of air filling the hollow core of polymer capillary waveguides with circular cross section are investigated theoretically. Effectiveness of the approach is checked on example of the water vapor absorption spectrum reconstruction.

Key words:

waveguide, mode, terahertz pulsed spectroscopy.

В настоящее время интенсивно развивается метод импульсной терагерцовой (ТГц) спектроскопии сред. Данный метод предполагает использование импульсных источников ТГц излучения, принцип действия которых основан на нелинейном преобразовании оптических лазерных импульсов в ТГц-диапазоне с помощью фотоантенн. В стандартном варианте метода ТГц спектроскопии воздуха сравниваются импульсы, прошедшие через однородное пространство [1]. Здесь с помощью регулируемой линии задержки измеряются импульсы $E_y^{(0)}(\tau)$ и $E_y(\tau)$, ($\tau = t - zc^{-1}$, t – время, c – скорость света), прошедшие расстояние z между источником и приемником ТГц поля через чистый сухой воздух и воздух с исследуемой примесью соответственно. Определение спектра коэффициента поглощения примеси k(f) осуществляется по формуле [1]

$$k(f) = -(k_0 z)^{-1} \ln \left| \hat{E}_y(f) [\hat{E}_y^{(0)}(f)]^{-1} \right|, \qquad (1)$$

где $k_0 = 2\pi f c^{-1}$; $\hat{E}_y(f)$ и $\hat{E}_y^{(0)}(f) - фурье-образы функций <math>E_y(\tau)$ и $E_y^{(0)}(\tau)$; f – частота.

Серьезным препятствием при таком подходе является значительная дифракционная расходимость ТГц импульсного излучения [1].

Использования ТГц волновода с полой сердцевиной, содержащей исследуемый воздух, позволяет устранить эффект дифракционной расходимости и за счет этого существенно повысить отношение сигнал/шум. Вместе с тем, волноводная ТГц спектроскопия также имеет ограничения, которые исследуются в настоящем сообщении.

Среди волноводов с полой сердцевиной, предназначенных для передачи ТГц сигналов, наиболее перспективны полимерные капилляры кругового сечения с металлизированными границами. Известны два типа таких волноводов: волноводы 1, у которых металлическое покрытие микронной толщины, превышающей толщину скин-слоя, нанесено на внутреннюю поверхность полимерного капилляра и волноводы 2, которые отличаются от волноводов 1 наличием дополнительного диэлектрического слоя с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_L = \varepsilon'_L + i\varepsilon''_L$ и толщиной *d*, который находится между металлическим покрытием и полой сердцевиной. Данный слой служит для минимизации затухания основной моды волновода на частоте *f* за счет изоляции ее поля от металлического покрытия. Приближенно такая минимизация достигается при условии

$$k_0 d = (\varepsilon_L' - 1)^{-0.5} \tan^{-1} [(\varepsilon_L' (\varepsilon_L' - 1)^{-0.5})^{0.5}].$$
⁽²⁾

В современных работах, где анализируются характеристики названных волноводов, основное внимание уделяется расчету затухания их мод в случае монохроматического излучения. Пропускание через волноводы широкополосных ТГц импульсов исследовалось только экспериментально, с использованием коротких отрезков волноводов, длина которых не превосходила 45 см. Слабо изучены и вопросы ТГц спектроскопии воздуха, заполняющего полую сердцевину волноводов. Качественные соображения, высказанные в литературе, позволяют лишь предположить, что основным ограничивающим фактором при такой спектроскопии может быть многомодовый режим работы капиллярных волноводов с металлизированной границей, неизбежный при передаче широкополосных импульсов.

Ниже представлена техника расчета распространения ТГц импульсов в волноводах. В ней поле импульса представляется в виде суперпозиции импульсов полей отдельных волноводных мод, найденных интегрированием монохроматических компонент. Выполнен сопоставительный анализ капиллярных волноводов обоих из указанных выше типов с позиций восстановления спектра поглощения примесного компонента в воздухе, заполняющем полую сердцевину волновода методом ТГц спектроскопии. В качестве примесного компонента рассмотрен водяной пар.

Пусть на входной торец волновода, находящийся в плоскости z = 0, поступает линейно поляризованный вдоль оси 0y ТГц импульс, создаваемый фотоантенной. Воспользуемся моделью этого импульса [2]

$$E_{v} = A \exp(-r^{2} w^{-2}) P(t), \qquad (3)$$

где E_y – компонента напряженности электрического поля; A – амплитудный множитель; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; w – радиус гауссова пучка;

$$P(t) = -1,229U(-2,-\zeta\sqrt{2})\exp(-0,5\zeta^{2}), \qquad (4)$$

где U(...) – функция параболического цилиндра; $\zeta = tT^{-1}$; t – время; τ – масштабный фактор, который может регулироваться длительностью и условиями фокусировки оптического лазерного импульса [2]. Фурье-образ функции (4) $\hat{P}(f)$, определяющий спектр импульса, имеет вид:

$$\begin{split} \hat{P}(f) &= -\frac{0,6143}{\sqrt{\pi}} T \exp\left(-\frac{\Omega^2}{4}\right) \sum_{j=0}^{\infty} \left(\prod_{l=1}^{j} \frac{l+j}{4}\right) \sum_{k=0}^{j} [A_j^{(0)} S_{kj}^{(0)} - i(j+\frac{1}{2}) \Omega A_j^{(2)} S_{kj}^{(2)}], \\ \Pi \\ \Omega &= 2\pi f T, \\ A_j^{(p)} &= A_{j-1}^{(p)} \frac{(4j-7+p)}{2j(2j-1+p)}; \\ S_{kj}^{(p)} &= -S_{k-1j}^{(p)} \frac{(j-k+1)\Omega^2}{2k(2k-1+p)}; \\ A_0^{(0)} &= -\Gamma\left(\frac{5}{4}\right) 2^{\frac{1}{4}} \left(\sqrt{\pi}\right)^{-1}; \\ A_0^{(2)} &= -\Gamma\left(\frac{7}{4}\right) 2^{\frac{5}{4}} \left(\sqrt{\pi}\right)^{-1}; \\ S_{0j}^{(0)} &= S_{0j}^{(2)} = 1. \end{split}$$

Максимум модуля $|\hat{P}(f)|$, равный 0,2215*T*, достигается при $f = 0,2769T^{-1}$. В дальнейших расчетах выбрано значение $T = 0,2769 \,\mathrm{nc}$, при котором указанному максимуму соответствует частота $f = 1 \mathrm{T} \Gamma \mathrm{I}$.

Электромагнитное поле импульса в волноводе представим в виде суммы импульсов полей волноводных мод:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}(r,\phi,z,t) \\ \mathbf{H}(r,\phi,z,t) \end{pmatrix} = A \sum_{\nu=1}^{m} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_{\nu}(r,\phi,z,t) \\ \mathbf{H}_{\nu}(r,\phi,z,t) \end{pmatrix},$$
(5)

где r, φ, z ($z \ge 0$) – цилиндрические координаты; ν – номер моды; m – число учитываемых мод.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_{v}(r,\varphi,z,t) \\ \mathbf{H}_{v}(r,\varphi,z,t) \end{pmatrix} = 4\pi \operatorname{Re} \int_{0}^{\infty} C_{v}(f) \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{v}(r,\varphi,f) \\ \mathbf{h}_{v}(r,\varphi,f) \end{pmatrix} \exp\{i[2\pi ft - k_{0}\beta_{v}(f)z]\} df, \quad (6)$$

где C_v – амплитуда моды; β_v – безразмерная постоянная распространения моды; \mathbf{e}_v и \mathbf{h}_v - векторы электромагнитного поля моды на частоте f.

Учитывая известные соотношения ортогональности

$$\int_{0}^{2\pi} d\phi \int_{0}^{\infty} drr(\mathbf{e}_{\mu} \times \mathbf{h}_{\nu}^{*})_{z} = \delta_{\mu\nu} \int_{0}^{2\pi} d\phi \int_{0}^{\infty} drr(\mathbf{e}_{\nu} \times \mathbf{h}_{\nu}^{*})_{z},$$

из выражений (3,5,6) получаем:

$$C_{v} = -\hat{P}(f)\int_{0}^{\infty} drr \exp(-r^{2}w^{-2}) \left(\int_{0}^{2\pi} d\phi \int_{0}^{\infty} drr (\mathbf{e}_{v} \times \mathbf{h}_{v}^{*})_{z}\right)^{-1}.$$
 (7)

В соответствии с (7), амплитуды C_v отличны от нуля только для тех мод, у которых компонента поля h_{vx} является четной функцией x и y. Такие моды являются аналогами HE_{1m} мод круглого диэлектрического волновода. В разложении (5, 6) фигурируют только поля указанных мод.

Для рассматриваемых в настоящей работе с цилиндрической симметрией строгий расчет их модовых характеристик может быть выполнен с использованием цилиндрических функций.

Заметим, что при естественном условии $k_0 z >> 1$ численное интегрирование в (6) затруднено быстрыми осцилляциями подынтегральной функции. Избежать этой проблемы позволяет квадратурная формула

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_{v} \\ \mathbf{H}_{v} \end{pmatrix} = 8\pi \operatorname{Re} \sum_{j} \frac{\sin(\pi \Delta f \,\alpha_{vj})}{\alpha_{vj}} \left\{ C_{v} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{v} \\ \mathbf{h}_{v} \end{pmatrix} \exp \left[2\pi i f \left[\tau - (\beta_{v} - 1) \frac{z}{c} \right] \right] \right\}_{f=f_{j}}, \quad (8)$$

где $\alpha_{vj} = \tau + zc^{-1} \{1 - c[\upsilon_{gv}(f_j)]^{-1}\},$ вещественная часть параметра $\upsilon_{gv}(f_j) = c(\beta_v + fd\beta_v / df)_{f=f_j}^{-1}$, имеет смысл групповой скорости моды.

Выражение (8) получено в результате разбиения эффективного промежутка интегрирования в (6) на элементарные интервалы протяженности Δf с центрами на частотах $f = f_j$ и аналитического интегрирования на этих интервалах быстро осциллирующей экспоненты.

Пусть $E_y(\tau)$ и $E_y^{(0)}(\tau)$ представляют собой импульсы компоненты напряженности электрического поля на выходе волновода в центре его полой сердцевины. Предположим также, что выполняется естественное условие $|\Delta n| << 1$, где $\Delta n = \text{Re}\Delta n - ik(f)$ – приращение комплексного показателя преломления сердцевины волновода n, вызванное наличием примеси в

сухом воздухе. В этом случае заметное изменение фурье-образа поля (5) будет связано только с экспоненциальными множителями в (6), содержащими большой параметр $k_0 z$. В главном приближении

$$\frac{\hat{E}_{y}(f)}{\hat{E}_{y}^{(0)}(f)} = \left[\sum_{\nu=1}^{m} C_{\nu} e_{\nu y} \exp(-ik_{0}\beta_{\nu}z)\right]^{-1} \sum_{\nu=1}^{m} C_{\nu} e_{\nu y} \exp\left[-ik_{0}\left(\beta_{\nu} + \frac{\partial\beta_{\nu}}{\partial n}\Delta n\right)z\right], \quad (9)$$

где функции частоты $C_{\nu}(f)$, $e_{\nu\nu}(0,0,f)$, $\beta_{\nu}(f)$, $\partial\beta_{\nu}(f)/\partial n$ вычисляются при $\Delta n = 0$. Заметим, что в соответствии с волноводной теорией возмущений, мнимая часть производной $\partial\beta_{\nu}(f)/\partial n$ пренебрежимо мала по сравнению с ее вещественной частью. Поэтому производные $\partial\beta_{\nu}/\partial n$ в (9) могут быть заменены на $\partial \operatorname{Re}\beta_{\nu}/\partial n$.

В общем случае найти функцию k(f) из уравнения (9) достаточно сложно. Ситуация упрощается, если на данной частоте при некотором номере $\mu \exp(\text{Im}\beta_{\mu}k_{0}z) >> \exp(\text{Im}\beta_{\nu}k_{0}z)$ ($\nu \neq \mu$). Тогда волновод может рассматриваться как одномодовый, и в соответствии с (9)

$$k(f) = -(k_0 z \partial \operatorname{Re}\beta_{\mu} / \partial n)^{-1} \ln \left| \hat{E}_{y}(f) [\hat{E}_{y}^{(0)}(f)]^{-1} \right|.$$
(10)

Выражение (10) сохраняет силу и в случае многомодового волновода, если зависимостью производных $\partial \beta_v(f) / \partial n$ от номера моды можно пренебречь. Именно такая ситуация имеет место для рассматриваемых волноводов 1 и 2. Здесь основной вклад в суммы в (9) дают только моды, находящиеся в условиях, удаленных от критических, для которых $\partial \beta_v(f) / \partial n \approx 1$.

Расчеты выполнены для волноводов 1 и 2 с серебряным покрытием и внутренним радиусом 1,5 мм. Для задания диэлектрической проницаемости покрытия ε_m использована дисперсионная модель Друде:

$$\varepsilon_m = 1 - \Omega_p^2 (F^2 + \Omega_t^2)^{-1} - i \Omega_p^2 \Omega_t [F(F^2 + \Omega_t^2)]^{-1},$$

где $\Omega_p = 73381$; $\Omega_t = 147,376$; F = 100 f / 3; f берется в ТГц.

Материалом диэлектрического слоя, отделяющего металлическое покрытие от полой сердцевины волновода выбран полипропилен с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_L = 2,229 - i3,88 \cdot 10^{-3}$. Толщина слоя d = 41,2 мкм найдена из (1) при f = 1ТГц. Радиус гауссова пучка w полагался равным 1024 мкм для волновода 1 и 800 мкм для волновода 2. Эти значения обеспечивают максимальную передачу энергии импульса (3) через рассмотренные далее отрезки волноводов длиной z = 1м.



Рис. 1. Импульсы на выходе волноводов 1 (а) и 2 (б). Сплошные кривые соответствуют сухому воздуху (n=1), дискретные точки – влажному воздуху (левая ось). Штриховые кривые – импульсы в однородном пространстве с n=1(правая ось)

На рис. 1 приведены импульсы компоненты поля E_y в волноводах 1, 2 и в свободном пространстве. Вычисления выполнены на основании квадратурной формулы (8) при выборе эффективного диапазона интегрирования в (6) 4TГц $\geq f \geq 0$ ТГц. Результаты, устойчивые относительно задания частотного шага Δf , получены при $\Delta f \leq 0,01$ ТГц. Дискретными точками на рис.1. представлены импульсы, соответствующие заполнению сердцевины волноводов влажным воздухом. Для задания Δn использована модель Друде – Лоренца: $\Delta n = \sum_{j=1}^{29} a_j [b_j (f_j^2 - f^2) + if b_j^2]^{-1}$, в которой параметры a_j , b_j , f_j – определены путем интерполяции экспериментальных данных для спектра $k(f) = -\Delta n(f)$, измеренного в лабораторных условиях в [3].

На рис.2 представлены результаты решения обратной задачи ТГц спектроскопии, полученные на основании (1) после вычисления фурьеобразов, приведенных выше импульсов на выходе волноводов.

Согласно рис.2., волноводная ТГц спектроскопия воздуха в целом достаточно эффективна. Вместе с тем, она приводит к колебаниям восстанавливаемых функций, которые объясняются не полным совпадением производных $\partial \beta_v / \partial n$ при различных v в (9) и их отклонением от 1.



Рис. 2. Восстановление спектра коэффициента поглощения водяного пара методом ТГц спектроскопии при использовании волноводов 1 (а) и 2 (б). Серая кривая – точная функция k(f), черные колеблющиеся кривые – ее восстановление на основании (9)

Данные расхождения сильнее выражены для мод волновода 1, с чем связана более низкая точность восстановления функции k(f) на рис. 2, а по сравнению с рис. 2, б (среднеквадратичные погрешности восстановления k(f) функции на рис. 2, а и 2, б равны $1,14 \cdot 10^{-6}$ и $3,99 \cdot 10^{-7}$ соответственно).

Развитый подход может быть использован для оптимизации условий волноводной импульсной ТГц спектроскопии.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант F15R-138).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dexheimer, S. L.** Terahertz spectroscopy: principles and applications / S. L. Dexheimer // CRS Press. Taylor and Francis group. 2007. – 360 p.

2. Cherenkov Radiation from Femtosecond Optical Pulses in Electro-Optic Media / D. H. Auston [et. al.] // Physics Review Letters. – Vol. 53, N.16 – 1984. – P. 1555–1558.

3. Cheville, R. A. Far-infrared terahertz time-domain spectroscopy of flames / R. A. Cheville, D. Grischkowsky // Optics Letters. – Vol. 20, No. 15. – 1995. – P. 1646–1648.

УДК 535.34; 621.372 ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

А. В. ШУЛЬГА, И. В. ШИЛОВА, А. В. ХОМЧЕНКО, *А. В. ТОМОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

*УО «Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова» Могилев, Беларусь

UDC 535.34; 621.372 INTRACAVITY LASER SPECTROSCOPY OF GUIDED STRUCTURES A. V. SHULGA, I. V. SHILOVA, A. V. KHOMCHENKO, A. V. TOMOV

Аннотация

Предложен метод внутрирезонаторной волноводной спектроскопии тонкоплёночных структур, основанный на регистрации и обработке углового спектра светового пучка, отражённого от призменного устройства связи в случае возбуждения волноводных мод в тонкоплёночной структуре внутрирезонаторным излучением лазера с низким коэффициентом усиления посредством призмы связи в форме параллелепипеда, в которой внутрирезонаторное излучение падает на входную (выходную) грань призмы под углом Брюстера и претерпевает двукратное внутреннее отражение в призме. Продемонстрировано, что возбуждение волноводных мод может осуществляться при слабой связи и высоком контрасте, что позволяет использовать предложенный метод для измерения оптических параметров планарных волноводов с низкими потерями.

Ключевые слова:

внутрирезонаторная лазерная спектроскопия, волноводная спектроскопия, устройство связи с брюстеровской призмой, тонкие плёнки, планарный волновод.

Abstract

A new technique of intracavity waveguide spectroscopy for investigating planar waveguide was proposed. It's based on recording and processing angular spectrum of a light beam reflected from a prism coupler in the case of exciting a guided mode in thin-film structure by the intracavity radiation of low-gain laser using a parallelepiped coupling prism in which the intracavity radiation enters the input faces of the prism at the Brewster angles and undergoes double internal reflection in the prism. It was demonstrated that the excitation of guided modes can be performed at the weak coupling. It was shown that the proposed technique can be used for measuring the optical parameters of low-loss planar waveguides.

Key words:

Intracavity laser spectroscopy, waveguide spectroscopy, Brewster prism coupler, thin films, m-line, weak coupling, planar waveguide.

Измерение малых потерь в тонких плёнках

Разработка прецизионных методов измерения оптических параметров является одной из задач волноводной спектроскопии тонких плёнок [1]. Одним из параметров, представляющих интерес для исследователя, являются действительная и мнимая части постоянной распространения волноводной моды h [2]. Среди волноводных методов исследования тонких плёнок в настоящее время наиболее востребованными являются методы с применением призменных устройств связи [3], в которых исследуется интенсивность световых пучков, отражённых от призменных устройств связи при возбуждении волноводной моды в тонкоплёночной структуре, прижатой через буферный слой (воздушный зазор) к основанию призмы.

Следует отметить, что возбуждение волноводных мод может происходить только при следующих условиях: во-первых, показатель преломления материала призмы должен быть больше волноводного показателя преломления моды; во-вторых, фазовая скорость волны в поверхностном слое должна быть равна скорости распространения волноводной моды в исследуемой структуре; в-третьих, ширина буферного слоя должна быть достаточно малой для эффективного туннелирования световой энергии в волновод. При выполнении указанных условий в отражённом свете будут наблюдаться, так называемые, черные *т*-линии, угловое положение которых соответствует углу возбуждения волноводной моды. Измерение углового положения *т*-линии позволяет рассчитать эффективный волноводный показатель преломления волноводной моды соответствующего порядка. При этом угловое распределение интенсивности отражённого света, в случае возбуждения волноводной моды определяется оптическими свойствами волновода, в частности, мнимой частью постоянной распространения волноводной моды $Im(h/k_0)$ (где k_0 – волновое число). Точность определения $Im(h/k_0)$ существенно зависит от толщины буферного слоя, что затрудняет исследование волноводов с малыми потерями, для которых $Im(h/k_0) < 10^{-5}$. Для уменьшения влияния призмы связи зазор между призмой и волноводом должен быть достаточно большим, что в свою, очередь уменьшает возможность регистрации отражённого от призмы связи излучения с необходимым контрастом. Для решения данной проблемы был предложен метод внутрирезонаторного возбуждения волноводных мод [4].

Интенсивность излучения лазеров с низким коэффициентом усиления очень чувствительна к внутрирезонаторным потерям. Если коэффициент усиления резонатора не превышает потери, то в этом случае генерации излучения не будет вообще [5]. Небольшие изменения коэффициентов поглощения внутрирезонаторных элементов приводят к значительным изменениям мощности выходного лазерного излучения. По этой причине внутрирезонаторная лазерная спектроскопия может применяться в качестве высокочувствительного метода для измерения сверхмалых оптических потерь. Прямое помещение призмы связи в резонатор без срыва генерации лазера невозможно по двум основным причинам: во-первых, вращение призмы связи вызовет разъюстировку резонатора; во-вторых, френелевские потери на гранях призмы могут превышать коэффициент усиления лазера, что также исключает возможность генерации излучения. В нашем случае, для решения данных проблем призма связи была сделана в форме параллелепипеда с параллельными противоположными гранями. При помещении призмы в резонатор гелий-неонового лазера внутрирезонаторное излучение претерпевало двукратное полное внутреннее отражение, сохраняя при этом углы падения и пропускания неизменными. Для уменьшения френелевских потерь призма связи была сделана таким образом, чтобы свет после отражения от основания призмы попадал на выходную грань призмы под углом близким к углу Брюстера. Таким образом, данная конструкция обеспечивала возможность регистрации спектров отражения в большом угловом диапазоне без срыва генерации излучения.

Внутрирезонаторная волноводная спектроскопия

Для регистрации спектров отражения внутрирезонаторного излучения в зависимости от угла падения на грань призмы связи была собрана установка, оптическая схема которой представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Брюстеровская призма связи 1 (n = 1,65708) со слабопоглощающим волноводом 2 на стеклянной подложке 3 помещалась в резонатор лазера, состоящего из двух сферических зеркал: «квазиглухого» 4 и выходного 5. Толщина воздушного зазора 6 контролировалась прижимным винтом 7. Брюстеровская призма связи устанавливалась между выходным зеркалом и газоразрядной трубкой 8 гелий-неонового лазера. Угловое положение призмы с заданной точностью изменялось поворотной платформой 9, приводимой в движение шаговым двигателем. Интенсивность выходного излучения лазера регистрировалась фотодиодом 10. Излучение, выходящее из «квазиглухого» зеркала регистрировалось координатным (сегментным) фотодиодом 11. Установка была настроена на максимум выходного излучения. Неподвижная установка зеркал резонатора приводит к угловому сдвигу лазерного луча и разъюстировке системы при изменении углового положения призмы связи. Поэтому для обеспечения неизменности углового положения лазерного луча держатель выходного зеркала помещался на платформе продольного перемещения 11. Система была автоматизирована следующим образом. Перед процессом измерения координатный фотодиод устанавливается таким образом, чтобы излучение лазера попадало в его центр. Поворот призмы связи приводит к угловому сдвигу лазерного луча, что регистрируется координатным фотодиодом в виде разности интенсивности сигналов от правых и левых его сегментов. Платформа продольного перемещения двигала выходное зеркало в направлении, перпендикулярном оптической оси лазера, до восстановления первоначальной интенсивности сигналов, что свидетельствовало об установке первоначального углового направления распространения внутрирезонаторного излучения. Только после этого производилась регистрация выходного излучения лазера фотодетектором 10. В установке шаг углового перемещения платформы составлял $\Delta \gamma = 1, 1 \cdot 10^{-4}$ градуса. Угол отражения внутрирезонаторного излучения от «входной-выходной» грани призмы измерялся гониометром с погрешностью измерения угла равной 3".

Для обеспечения возможности сравнения экспериментальных данных, полученных внутрирезонаторным методом, с данными, полученными «внерезонаторным» методом, в экспериментальной установке было предусмотрено дополнительное плоское выходное зеркало 13 с фокусирующей линзой 14, которые могли помещаться между газоразрядной трубкой гелий-неонового лазера и призмой связи.

В качестве тестового образца использовался пятимодовый ионнообменный волновод с низкими потерями [6]. Призма связи была сделана таким образом, чтобы угол при её основании позволял лазерному лучу, с одной стороны, отражаться под углом Брюстера и, с другой стороны, падать на основание призмы связи под углами возбуждения волноводных мод. Оптические параметры данного волновода были измерены независимым методом [7] и для мод, зарегистрированных внутрирезонаторным методом, мнимая часть постоянной распространения $Im(h/k_0) \sim 10^{-5}$ (табл. 1). Зазор между волноводом и призмой связи регулировался прижимным винтом для обеспечения наибольшего контраста интенсивности. Зарегистрированные спектры внутрирезонаторного отражения представлены на рис. 2.



Угол падения излучения на «входную-выходную» грань призмы, град

Рис. 2. Зависимость интенсивности на выходе внутрирезонаторного излучения в зависимости от углового положения призмы связи

Порядок волноводной моды	$Re(h/k_0)$	$Im(h/k_0) \times 10^{-5}$
1	1,53359	3,7
2	1,52863	3,1
3	1,52384	1,5
4	1,51928	2,6

Табл. 1. Оптические параметры тестового волновода

Полученные данные показывают, что предложенный метод позволяет регистрировать спектры отражения в случае слабой связи. Следует отметить, что спектры «внерезонаторного» отражения не имели резонансных провалов для слабой связи и наблюдались только при сильном прижатии тестового волновода к призме связи. Данный факт подтверждает преимущество внутрирезонаторного метода при регистрации волноводов с низкими потерями при слабой связи. Несмотря на трудности реализации данного подхода, это позволило авторам улучшить метод волноводной спектроскопии.

Заключение

Анализ зарегистрированных угловых зависимостей интенсивности света, отражённого вблизи углов возбуждения волноводных мод, показывает, что метод внутрирезонаторной спектроскопии обеспечивает намного больший контраст регистрации интенсивности излучения в сравнении с обычными волноводными методами. Высокая чувствительность предложенного метода позволяет измерять малые оптические потери в случае слабой связи призмы и волновода и минимизировать влияние материала призмы связи на данные измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tien, P. K.** Light waves in thin films and integrated optics, Applied Optics, 10 (1971), P. 2395-2413.

2. Khomchenko, A. V. Waveguide spectroscopy of thing films, Volume 33, (2005).

3. Ulrich, R. Measurement of thin film parameters with a prism coupler / R. Ulrich, R. Torge // 12 (1973), Applied Optics, P. 1325–1337.

4. **Baev, V. M.,** T. Latz, P. E. Toschek, Laser intracavity absorption spectroscopy, Applied Physics B, 69 (1999), P. 171-202.

5. Csele, M. S. Laser modeling. A numerical Approach with Algebra and Calculus, (2014).

6. Mode interference pattern in ion-exchanged channel waveguides / I. G. Voitenko [et. al.] // Guided Wave Optics. SPIE Vol. 1932 (1993). – P. 2-13.

7. **Khomchenko, A. V.** Spatial Fourier spectroscopy of guided modes in low dimensional structures / A. V. Khomchenko // Applied Optics 41 (2002), P. 4548-4551.

E-mail: <u>ashulga@tut.by</u>

УДК 620

К ВОПРОСУ МОДЕРНИЗАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ С СОХРАНЕНИЕМ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Б. В. АРТЕМЬЕВ, И. Б. АРТЕМЬЕВ

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «СПЕКТР» Москва, Россия

UDC 620

ON THE QUESTION OF MODERNIZATION OF RADIATION THICK-NOMENERS WITH PRESERVATION OF THEIR METROLOGICAL CHARACTERISTICS

B. V. ARTEMIEV, I. B. ARTEMIEV

Аннотация

В настоящее время в машиностроительной отрасли России наблюдается тенденция отказа от источников изотопного излучения в пользу рентгеновских аппаратов. Это связано с несколькими проблемами, главными из которых являются: задача обеспечения радиационной безопасности и проведения технического обслуживания, перемещение источников гамма-излучения и вывод их из эксплуатации.

По сравнению с изотопными источниками рентгеновские, применительно к задачам толщинометрии, имеют ряд недостатков: спектральное распределение энергии излучения и, следовательно, изменение спектра по мере прохождения излучения через контролируемый материал; нестабильность излучения во времени по сравнению с гамма-источниками. Все это усложняет использование рентгеновских источников для измерения толщины материалов с различным химическим составом, например при прокатном производстве цветных металлов.

Ключевые слова:

рентгеновский контроль, рентгеновская толщинометрия, радиометрия.

Abstract

At present, there is a tendency in the machine building industry of Russia to refuse sources of isotope radiation in favor of X-ray machines. This is due to several problems, the most important of which are: the task of ensuring radiation safety and maintenance, the transfer of gamma radiation sources and their decommissioning.

In comparison with isotope sources, X-ray, with respect to the problems of thickness measurement, have a number of disadvantages. The spectral distribution of the energy of radiation and, consequently, the change in spectrum as the radiation passes through the material to be monitored. The instability of radiation in time in comparison with gamma sources. All this complicates the use of X-ray sources to measure the thickness of materials with different chemical composition, for example, in the rolling production of non-ferrous metals.

Key words:

X-ray inspection, X-ray thickness measurement, radiometry.

На металлургических предприятиях России для решения задачи измерения толщины выпускаемого металлического проката широко используются бесконтактные рентгеновские и изотопные или радиационные толщиномеры. Широкое применение этих приборов обосновано их высокими метрологическими характеристиками, быстродействием и отсутствием контакта измерительного преобразователя с поверхностью движущегося в процессе проката металла. Радиационная толщинометрия – радиометрический метод неразрушающего контроля, предназначенный для измерения толщины или поверхностной плотности материала и основанный на измерении параметров ионизирующего излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения с контролируемым материалом согласно ГОСТ 24034-80 «Контроль неразрушающий радиационный» [1]. Парк радиационных толщиномеров требует постоянного технического обслуживания, ремонта и модернизации. В настоящее время к проблеме поддержания в рабочем состоянии эксплуатируемого на металлургических заводах оборудования добавилась новая задача, поставленная руководством нашей страны – импортозамещение.

Принципиальным отличием рентгеновских измерителей толщины от всех прочих методов измерения толщины и в т. ч. от контактных методов измерения, в том, что измеряются не реальные размеры, изменяющиеся при изменении температуры, а количество атомных слоев сквозь которые проходит пучок зондирующего излучения (обычно по нормали к плоскости контролируемого объекта) (рис. 1). Для одновременного решения этих задач на предприятии «ВИЗ-Сталь» г. Екатеринбург решено произвести работы по модернизации импортных толщиномеров FMM-24004 производства фирмы «Messelektronik» ГДР (разработка 80-х гг.). В толщиномере используется абсолютный метод измерения (рис. 1). Измерительный зазор – 160 мм. Измеряемая толщина стали d от 0,1 до 2,0 мм. Случайная погрешность (СКО) измерения на неподвижном образце толщиной 0,3 мм составляет 0,1 % относительно измеряемой толщины проката. В оборудовании в качестве источника излучения применяется изотоп Америций241, со следующими основными параметрами:

– энергия гамма-квантов 60 кэВ;

– плотность потока фотонов на расстоянии 1 м от центра рабочей поверхности – $(7,0\pm2,1)\cdot10^4\cdot c^{-1}$ см⁻²;

– максимальная активность Am241 в источнике – 2,24 Ku (8,3·10+10 Бк);

– период полураспада – 432,6 г.;

− энергия γ-квантов E = 59,5 кэВ (35,8 %).



Рис. 1. Схема измерительного тракта толщиномера FMM-24004

Источники ИГИА-5 М-1 выпускаются Российской фирмой «Изотоп» и без проблем могут быть приобретены в необходимом количестве.

В качестве приемника излучения в толщиномере использовалась газонаполненная аргоно-ксеноновая ионизационная камера (ИК) (рис. 2).



Рис. 2. Газонаполненная аргоно-ксеноновая ионизационная камера

Основные параметры ИК:

- диаметр 165 мм;
- высота 80 мм (с электродами 110 мм);
- материал корпуса алюминий толщиной 2 мм;
- входное окна алюминий толщиной 0,5 мм;
- напряжение питания 500 В.

В процессе эксплуатации толщиномеров камеры подвергались воздействию агрессивных сред и вибрации, ударному воздействию, со временем герметичность камер нарушилась, как следствие давление газовой смеси начало спадать. Уменьшение давления ведет к уменьшению плотности газовой смеси и снижению эффективности работы камеры. Число провзаимодействовавших квантов падает, а статистическая погрешность растет с одновременным снижением уровня выходного сигнала камеры. Повышение интенсивности источника не желательно, т. к. приведет к переоблучению персонала или потребует введения дополнительных защитных экранов в конструкцию приборов. Замена камеры на более эффективную, это наиболее простой и безопасный и экономически выгодный способ решения проблемы. В качестве прототипа была использована гетерогенная камера, разработанная ранее в ЗАО МНПО «СПЕКТР» для рентгеновского толщиномера РИТ10.6 [2–4]. Конструкция ИК [5–6] потребовала существенной доработки, т.к. эффективная энергия потока излучения в случае использования изотопного америциевого источника взамен использовавшегося ранее рентгеновского повышается на 30 %. Мощность дозы Р будет равна:

$$P = N \cdot E \cdot \mu b \cdot 1/a [(P \cdot M^2)/c] = 7 \cdot 10^4 \cdot 60 \cdot 0,028 \cdot 1/5,5 \cdot 10^{10} = 2,1 \cdot 10^{-6} [(P \cdot M^2)/c],$$

где N – число квантов попадающих на 1 см² в секунду на расстоянии 1 м от источника; Е – энергия γ квантов в кэВ; μ b – массовый коэффициент преобразования энергии излучения в воздухе см²/г.

При расстоянии от источника до центра камеры ~230 мм мощность дозы в плоскости геометрического центра камеры Рк будет $40,4\cdot10^{-6}$ P/c. Ток ионизационной камеры с объемом 1 см³ при этом составит

$$I_{\kappa} = 3,3 \cdot 10^{-10} \cdot 40, 4 \cdot 10^{-6} = 1,33 \cdot 10^{-14} \text{ A}$$
.

С учетом поглощения в материалах проката (0,05 ÷ 3 мм Fe)

$$I_{\kappa \min} = I_{\kappa \exp} (-\mu \cdot d) = 8 \cdot 10^{-16} \text{ A/cm}^3$$
,

где d – максимальная толщина ленты – 0,3 см; µ – коэффициент линейного ослабления материала проката при энергии фотонов 60 кэВ составляет 9,42 см⁻¹ при его плотности 7,86 г/см³.

Учитывая, что современные операционные усилители плохо работают с такими малыми значениями токов, необходимо либо повысить активность источника, что недопустимо с точки зрения радиационной безопасности, либо существенно, не менее чем на 2.10⁴ увеличить чувствительность ионизационной камеры.

Чувствительность ионизационной камеры можно увеличить двумя способами – увеличением площади входного окна и высоты камеры. Из конструкторских требований (ТЗ) объем может быть увеличен не более V см³:

$$V = \pi R2 \cdot h = 3,14 \cdot (6,5)2 \cdot 10 = 1,3 \cdot 10^3 \text{ cm}^3.$$

Что позволит получить при минимальной и максимальной толщине проката ток:

$$I_{\kappa \min} = 8 \cdot 10^{-16} \cdot 1.3 \cdot 10^3 = 10^{-12} \text{A}.$$

$$I_{\kappa \max} = 1.33 \cdot 10^{-14} \cdot 1.3 \cdot 10^3 = 1.7 \cdot 10^{-11} \text{A}.$$

Диапазон токов ионизационной камеры от 10⁻¹² до 10⁻¹¹А незначителен, однако для улучшения отношения сигнал/шум желательно повысить чувствительность, как минимум на порядок. Для этого используем в качестве активного материала для покрытия электродов камеры высокоатомное напыление с толщиной равной или меньшей длине свободного пробега электронов в материале покрытия. При этом коэффициент увеличения чувствительности ионизационной камеры Ку будет равен:

$$Ky = \mu_z / \mu_{BO3I} = 4,27/0,0283 = 150$$
,

где μ_z – коэффициент электронного преобразования энергии фотонов для материала электродов камеры с атомным номером Z; $\mu_{возд}$. – коэффициент электронного преобразования энергии фотонов в воздухе.

С учетом не полного выхода электронов из электродов, ослабления излучения за счет расстояния и поглощения в электродах камеры будем считать $\eta = 30$ %, а Ку = 45 получим:

 $I_{\kappa \min} = 4,5 \cdot 10^{-11}$ A; (3 mm Fe). $I_{\kappa \max} = 7,6 \cdot 10^{-10}$ A; (0,1 mm Fe).

Для преобразования тока камеры в цифровой сигнал следует разработать электронную схему измерения с использованием АЦП с интегрированием сигнала камеры на емкости большей $50 \cdot 10^{-12}$ Ф. Постоянная времени цепи разряда с учетом собственной емкости камеры и входного сопротивления АЦП τ будет меньше50 мс, что полностью удовлетворяет техническому заданию. Технические требования, предъявленные заказчиком к ионизационной камере и значения полученные в результате испытаний изготовленной камеры, приведены в табл.1.

Параметр	Предъявленное	Полученное зна-	Соответствие техни-
	значение	чение	ческим требованиям
Чувствительность,	9,5·10 ⁻⁵	$2 \cdot 10^{-3}$	Дa
A·c/Γp			
Динамический	10^{3}	10^{3}	Дa
диапазон, отн. ед.			
Напряжение	400	$150 \div 500$	Дa
питания, В			
Габаритные	Диаметр 165	Диаметр 165	Дa
размеры, мм	Высота 125	Высота 125	

Табл. 1. Основные параметры ИК

Камера (рис.3) содержит корпус в виде полого металлического цилиндра с рентгенопрозрачными электропроводящими крышками на торцах, симметрично размещенные между крышками вдоль продольной оси корпуса камеры и параллельные пластины из рентгенопрозрачного диэлектрического материала, чередующиеся высоковольтные и собирающие электроды, которые выполнены в виде покрытий из материала с высоким Z и изолированы от корпуса и крайних пластин, жестко закрепленных образующими поверхностями в заделках торцевых плоскостей корпуса. Расстояния между покрытиями высоковольтных и собирающих электродов соответственно равны, а полость камеры герметична и заполнена воздухом. Два металлических стержня, один из которых электрически связан с покрытиями высоковольтных электродов, но изолирован от покрытий собирающих электродов, а другой электрически связан с покрытиями собирающих электродов, но изолирован от покрытий высоковольтных электродов. Стержни размещены параллельно продольной оси корпуса камеры и жестко скреплены с пластинами. В результате получена высокая виброустойчивость камеры за счет обеспечения повышенной механической жесткости пластин и чувствительность. Уменьшение межэлектродных расстояний позволило увеличить напряженность в камере при постоянном напряжении питания высоковольтных электродов и тех же внешних габаритах камеры.



Рис. 3. Гетерогенная ионизационная камера

В процессе испытаний камеры были получены зависимости тока от мощности дозы для двух фокусных расстояний (рис. 4).



Рис. 4. Зависимости тока ионизационной камеры от мощности дозы для фокусного расстояния: а – 0,2 м; в – 2 м

Таким образом показано, что в диапазоне мощностей доз от 0,1 до 100 Р/мин, что соответствует динамическому диапазону 103, чувствительность камеры постоянна и равна 2 10⁻³ А с/Гр. Изменение напряжения пи-

тания камеры в диапазоне от 150 до 500 В несущественно влияет на чувствительность (рис. 5).



Рис. 5. Чувствительность ионизационной камеры от напряжения питания

Разработанная камера может с успехом заменять штатные детекторы на всех толщиномерах серии FMM-24004, что позволит повысить метрологические характеристики измерителей толщины и продлить срок их службы на заводах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. GOST 24034-80. Non-destructive testing radiation. Terms and Definitions.

2. Пат RUS2221220 15.11.2002. Рентгеновский измеритель параметров проката / Б. В. Артемьев, А. И. Маслов, В. Г. Запускалов и др.

3. Kanter B. M., Vladimirov L. V., Vladimirov Yu L and Artemyev I B 2016 Patent RU 163274. Communicating ionization chamber.

4. Artemiev B. V. and Shubochkin A E 2014 Testing. Diagnostics 2. p. 24-31.

5. The capabilities of multielectrode heterogeneous ionization chambers for x-ray thickness measurements / B. V. Artemev, A. I. Maslov // Russian Journal of Nondestructive Testing. -2006. - T. 42, No 5. - C. 345-349.

6. Использование рентгеновских толщиномеров в производстве проката цветных металлов / Б. В. Артемьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 6. – С. 55–61.

УДК 620.179.16

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

А. Р. БАЕВ, М. В. АСАДЧАЯ, К. П. ЖАВОРОНКОВ, Г. П. РАЗМЫСЛОВИЧ, В. В. ПАРАДИНЕЦ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620.179.16 ON EVALUATION OF THE STRENGTHEN METAL SURFACE DEPTH BY ULTRASONIC METHODS

A. R. BAEV, M. V. ASADCHAYA, K. P. ZAVORONKOV, G. P. RUZMYSLOVICH, V. V. PARADINETS

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование возможностей определения глубины упрочненных различными методами поверхностных слоев стальных образцов и чугуна ультразвуковыми методами, включая амплитудно-угловые и импульсный метод. Причем в первом случае в качестве информативного параметра служат экстремумы зависимости амплитуды отраженной продольной волны (метод гониометра) либо коэффициента преобразования падающего акустического луча в поверхностную волну (ПАВ) от толщины слоя упрочнения h. Представлены также характерные изменения скорости ПАВ от толщины слоя упрочнения и частоты волны. Показана принципиальная возможность повышения информативности структуроскопии поверхностных слоев металлов путем использования различных частот.

Ключевые слова:

упрочненный слой, амплитуда, поверхностная и продольная волна, отражение звука.

Annotation

Experimental investigation of the possibility to evaluate a depth of strange surface layers of irons and steels by using different methods including amplitude-angular and pulse one with using small aperture probes. So, in first case dependences of the angular maximums and minimums of the longitudinal waves amplitudes reflected from the tested metal surface (goniometric method) or transformed into surface waves (propagation method) are informative characteristics of the metal layers depth. Data on the special variation surface waves velocity vs. the strengthen metal layers depth and frequency have been got too. Principle possibility to increase informativity of the metal surface layer structure by using wave frequency varying.

Key words:

strengthen metal layer depth, amplitude, surface and volume wave, sound reflection.

В настоящее время для структуроскопии поверхностного слоя металлов применяют разрушающие и неразрушающие методы контроля, включая электромагнитные, токовихревые, шумов Баркгаузена, ультразвуковые и др. Использование для этих целей ультразвуковых методов весьма эффективно как при объемном прозвучивании объекта, так и поверхностном, где преимущественно скорости различных упругих мод c_{LTR} и их затухание δ являются наиболее информативными параметрами, зависящими от упругих свойств материалов и их структуры, где индексы L, T и R относятся к продольной, поперечной и поверхностной волне соответственно [1]. Отметим, что модули объемного сжатия металла *K*, сдвига *G* и динамического модуля Юнга могут быть представлены в виде обобщенной зависимости:

$$(c_{LTR})^2 = \{K, E, G\} \rho^{-1} f_{K, E, G}(v),$$
 (1)

где $f_{K,E,G}(v)$ – функция, определяемая выбором волновой моды и конкретного модуля; v – коэффициент Пуассона, определяемый из (1) по измеренному отношению скоростей разных мод.

Так, например, если известно значение $c^* = c_T / c_L$, то $v = 2 \frac{1 - c^{*2}}{2 - c^{*2}}$. Ука-

занные модули, характеризующие упругие и структурные свойства металла, изменяются в результате его механической, термической, термохимической обработки, коррозии, микроповрежденности, что непосредственно сказывается и на изменении величины с_{LTR}, ее частотной характеристики, а также на затухании волн вследствие диссипативных процессов и рэлеевского рассеяния. В некоторых случаях, когда отсутствуют условия для непосредственного определения скорости упругой волны (УВ) из-за аномально высокого затухания, сложного рельефа поверхности, масштаба неоднородности структуры металла и др., могут быть использованы методы, приведенные в работе [2], основанные на измерении косвенных параметров, находящихся в феноменологической или корреляционной связи с с_{LTR}. Среди них можно выделить амплитудно-угловые методы, основанные на

измерении угла падения волны на исследуемый объект (β_{LTR})*=arcsin $\frac{c_1}{c_{LTR}}$,

при которых наблюдается минимум амплитуды отраженной волны A_{mi} (метод гониометра, рис. 1), либо ее максимум A_{ma}, соответствующий максимальному коэффициенту преобразования падающей продольной волны в объемную подповерхностную или поверхностную (ПАВ) моды (метод прохождения).

Были проведены сравнительные экспериментальные исследования с целью выявления возможностей использования указанных методов, где в качестве объекта исследования служили плоские стальные образцы с упрочненным цементацией и последующей термообработкой поверхностным слоем толщиной *h*, изменяющейся от нуля до 1,35 мм (что достигалось путем механического среза слоя металла), а также с закаленным ТВЧ слоем толщиной, изменяющейся от нуля до 1,5 мм. Были также изготовлены образцы из чугуна с поверхностным отбелом толщиной от нуля до 2,5 мм.



Рис. 1. Гониометрическая схема устройства: 1 – опорная поверхность; 2 – иммерсионная среда; 3 – образец; 4 – излучающий преобразователь; 5 – приемный преобразователь; 6 – коромысла

При проведении экспериментальных исследований скорости ПАВ использован традиимпульсный ционный метод акустических баз), (двух где приемником служили малоапертурные преобразователи (ПЭП). Для исследования амплитудноугловых зависимостей, экстремумы которых связаны со скоростью упругой моды формулой Снеллиуса, использована установка, работающая по принципу гониометра (рис. 1). На опорные поверхности окна ванны с им-

мерсионной средой (водой), помещают исследуемый образец, отражающая продольные волны поверхность которого перпендикулярна плоскости падения УВ. С помощью специального привода (не показан) синхронно изменяется угол наклона опор излучателя волн и симметрично расположенного рефлектора, т. е. угол падения акустического пучка на поверхность объекта β и угол отражения θ устанавливаются одинаковыми. Преимущество представленной схемы измерений перед известным аналогом [1] заключается в повышении чувствительности амплитудно-угловой характеристики $\frac{\partial A}{\partial a}$ применительно к определению минимума отраженной от рефлектора (один или два раза) волны. При этом должно выполняться условие $\frac{\cos\beta a^2}{2\lambda Hn} > 1$, где H – расстояние от центра ПЭП до отражающей поверхности; λ – длина продольной волны; n – количество отражений УВ от рефлектора. (Для существенного уменьшения габаритов установки при измерении акустических свойств поверхности предложено использовать в качестве иммерсионной жидкости магнитную жидкость, удерживаемую источником магнитного поля).

Дополнительно методом прохождения [2] на частоте f = 1,8 МГц были исследованы амплитудно-угловые зависимости возбуждаемых ПАВ с целью определения угловых экстремумов { β_{ma} , β_{mi} }, где β_{ma} – соответствует максимуму исследуемой амплитудно-угловой зависимости; β_{mi} – минимуму. В этом случае возбуждение ПАВ и изменение угла падения акустического пучка на поверхность образца осуществляется путем перемещения

первичного преобразователя, установленного на цилиндрической поверхности плексигласовой призмы, по круговой траектории при постоянной точки выхода акустического луча О*. В этом случае использован режим эхо, где в качестве отражателя поверхностной волны служил отражатель, выполненный согласно предложенной нами ранее конструкции [3] из стали. Для повышения стабильности измерений как ПЭП, так и отражатель выполнены с магнитным прижимом. Причем за счет выбора своеобразной геометрии передней отражающей грани достигалось соотношение сигналшум более 30 дБ, что повышало надежность измерительной процедуры.

Некоторые результаты настоящих исследований представлены на рис. 2–5. На рис. 2 представлены экспериментально зависимости функции изменения сдвига угла экстремума амплитуды отраженного сигнала $\Delta\beta_m (h/\lambda)$ в частотном диапазоне $f = (1 \div 10)M\Gamma \mu$. Эти зависимости являются монотонно убывающими, причем их "крутизна", характеризуемая абсолютной величиной $\partial\beta_m / \partial h_\lambda$, также является убывающей функцией от h. Если же глубина упрочненного слоя фиксированная, то зависимость $\Delta\beta_m$ от частоты (или от обратного значения относительной длины волны) представляет собой также монотонно убывающую функцию, выходящую на насыщение в окрестности $h_\lambda \sim 1$.



Рис. 2. Изменение угла падения (приема) волны отраженного сигнала $\Delta\beta_{mi}$ от безразмерной толщины $h_{\lambda}=h/\lambda$ упрочненого цементацией (с последущей закалкой), измеренного на разных частотах: *f*, *МГц* = 1,1 (1); 3,3 (2); 5 (3); 10 (4)

Интересно, что если в качестве объекта исследования используются образцы чугуна со слоем отбела (рис. 3), то, как видно, подобная зависимость в диапазоне $h_{\lambda}\approx 0-1$ является возрастающей, а при $h_{\lambda}>1$ имеет слабо выраженный максимум. Как показывают исследования, когда глубина упрочненного слоя на стальных образцах увеличивается, то эффективная

скорость ПАВ падает. И наблюдаемый максимум амплитуды возбуждаемой поверхностной волны (метод прохождения) А_{ма} смещается в область больших углов, т.к. β_{ma}=arcsin(c₁/c_R). Этот же угол соответствует минимуму отраженной продольной волны, что наблюдается при измерениях по методу гониометра. Необходимо отметить, что при реализации гониометрического метода важный параметр $\partial \beta_{mi} / \partial h$, характеризующий точность установки _{β_{mi}}, меньше того, что достигается методом прохождения (∂ β_{ma}/∂h), который практически в 2 раза больше. Это обусловлено существенным различием отношения скоростей среды, из которой падают на объект продольные волны. Если же упрочняющим покрытием чугуна служит отбел, имеющий модуль Юнга, существенно превосходящий модуль подложки (чугуна), то с ростом толщины упрочнения величина $\partial \beta_{mi}/\partial h$ будет изменяться в обратную сторону. Очевидно, что именно в этом случае будет обеспечиваться наиболее высокая точность оценки глубины упрочнения. Однако, как видно из рис. 3, сказанное справедливо именно в том случае, когда $h_{\lambda} < 1$, что требует подбора рабочей частоты волны. Повидимому, при воздействии зондирующего сигнала в достаточно широком диапазоне частот представится возможным оценить не только глубину упрочненного слоя, но его структурные изменения по глубине



Рис. 3. Изменение угла падения волны $\Delta\beta$ mа на поверхность чугуна с отбелом в зависмости от его безразменой толщины h/λ

На рис. 4 и 5 приведены зависимости скорости ПАВ от глубины упрочнения упомянутых стальных образцов и частоты волны. Как видно, скорость ПАВ возрастает с увеличением глубины среза упрочненного слоя плавно и монотонно. При этом изменение скорости с_R тем больше, чем выше частота волны. Интересно отметить, что в исследованных образцах с закаленным ТВЧ слоем твердость σ_v имеет максимум на некоторой характерной глубине $h_c = h_c^*$. При этом с ростом частоты зондирующей волны

параметр $|\Delta c/\Delta h_c|$ уменьшается в окрестности максимума σ_v , а при приближении к области, граничащей с "сырой" основой металла, наблюдается обратная тенденция. Таким образом, изменение частоты волны, сопровождающееся изменением глубины области локализации ее энергии, дает возможность судить и о пространственных параметрах упрочняемого слоя.



Рис. 4. Скорость ПАВ (\blacktriangle , \blacklozenge , \blacksquare) и твердость закаленного слоя (\bullet) в зависимости от глубины его среза: частота волны *f*,*MГ* μ =1(\bigstar);1,8(\blacklozenge); 4 (\blacksquare)

Рис. 5. Скорость ПАВ (\blacksquare , \blacklozenge) и концентрация углерода q(\bullet) в зависимости от глубины среза цементированного слоя: частота волны f,МГц=1,8 (\blacksquare);3(\blacklozenge)

1

q, %

0,7

-0,2

h, 10⁻³ м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль : справочник в 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.

2. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов : справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткрамер. – М. : Металлургия, 1991.

3. Пат. 9911 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 29/04. Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн / А. Р. Баев, О. С. Сергеева, М. В. Асадчая, М. А. Тищенко ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № и 20130571 ; заявл. 08.07.13 ; опубл. 28.02.14 // Открытия. Изобретения. – 2014. – 4 с.
УДК 621.317 ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

А. И. БУРАНОК, А. И. ПАВЛЕНКО, А. Н. РОГОЖНИК

ОАО «Оптоэлектронные системы» Минск, Беларусь

UDC 621.317 MEASUREMENT OF MICRO-DISPLACEMENTS WITH CAPACITIVE SENSORS A. I. BURANOK, A. I. PAVLENKO, A. N. ROROZHNIK

Аннотация

В данной работе освещена проблематика создания емкостных датчиков для микро- и нанопозиционирования, существующие на данный момент конструктивные решения в этой области и достигнутые в процессе опытно-конструкторской работы характеристики.

Ключевые слова:

емкостной датчик, координатная система, нанопозиционирование.

Abstract

This paper reveals the problem of creating capacitive sensors for micro- and nano-positioning, current constructive solutions in this field and the characteristics obtained in the process of research and development work.

Key words:

capacitive sensor, coordinate system, nanopositioning.

Одним из решающих условий продвижения микро- и нанотехнологий в промышленное производство является обеспечение контроля геометрических параметров в нанометровом масштабе. Для этих целей могут применяться методы атомно силовой, интерференционной микроскопии. При этих методах сканируемый объект или сканирующее устройство (кантилевер, интерференционный объектив) перемещается на малые расстояния от нескольких микрон до нескольких сотен микрон.

При этом для построения системы управления подобными сканирующими и координатными устройствами возникает необходимость отслеживать их перемещение с высокой точностью, а также использовать сигнал положения или перемещения от первичных преобразователей как обратную связь.

Информация обратной связи при интеллектуальной обработке придает системе качество программно-адаптивной системы управления и в случае управления координатной системой перемещения позволяет [1]:

– отслеживать положение платформы устройства, перемещающего объект на малые расстояния от нескольких микрон до нескольких сот мик-

рон, (далее – позиционер) с дискретностью от долей нанометров од долей микрометров с заданной точностью;

– отслеживать и управлять скоростью движения позиционера;

 компенсировать погрешности перемещения исполнительных механизмов позиционера;

-компенсировать нелинейность актюаторов позиционера;

– в случае использования пьезоактюаторов позволяет компенсировать гистерезис и крип пьезокерамики.

В качестве датчика обратной связи в устройствах микропозиционирования, построенных на пьезоактюаторах, наилучшим образом зарекомендовали себя емкостные преобразователи.

Ёмкостные датчики по сравнению с тензометрическими и пьезоэлектрическими датчиками имеют следующий ряд преимуществ [2]:

 высокая чувствительность при малых перемещениях, порядка нанометров;

- более широкий частотный диапазон;

- отсутствие периодических ошибок;

– бесконтактность измерения;

– высокая линейность;

- высокая воспроизводимость;

– высокая стабильность.

С целью дальнейшего использования емкостных датчиков в измерительных комплексах ОАО «Оптоэлектронные системы» осуществлена разработка емкостных датчиков для задач бесконтактного измерения положения объектов в области нанопозиционирования. Датчики спроектированы таким образом, чтобы была возможность их использовать в разрабатываемых на предприятии позиционерах с различным диапазоном перемещений 100, 20, 8 и 2 мкм по трем, двум или одной координатам, с шагом перемещения порядка 10 нм.

Упрощенно, емкостной преобразователь представляет собой конденсатор переменной емкости. Разработанный датчик состоит из двух электродов, один из которых размещается на неподвижном основании, другой крепится на перемещаемый объект. Площадь активной поверхности датчика и диэлектрическая постоянная остаются неизменными, в то время как расстояние между электродами при позиционировании объекта меняется, что оказывает влияние на ёмкость. Сигнал с датчика обрабатывается контроллером, который передаёт сигнал на ПК.

Конструкция датчика представляет собой керамическую подложку, на которую нанесен слой металлизации Cr-Cu (хром-медь) и защитный слой Ni (никеля). Металлизированный участок делится:

– на рабочую площадку, которая является обкладкой конденсатора;

– на контактную площадку, к которой припаивается провод, соединяющий датчик с цифровым преобразователем.

Для минимизации размеров датчики не имеют корпуса, в позиционерах они приклеиваются к специальным кронштейнам. У большинства емкостных датчиков, предлагаемых зарубежными производителями, предусмотрен корпус, крепежные отверстия и экран, защищающий от электромагнитных помех. В рассматриваемом случае эта проблема решается за счет установки датчика внутри корпуса позиционера, который выполняет функцию защиты от электромагнитных помех, а также схемой подключения обкладок датчика с заземлением одной из обкладок. Дополнительной мерой для защиты от помех является размещение цифрового преобразователя внутри корпуса позиционера максимально близко от датчиков, чтобы исключить влияние на сигнал паразитных емкостей проводов.

Датчики разработаны двух типоразмеров с диапазонами перемещений от 20 до 100 мкм и от 2 до 8 мкм, т. к. в зависимости от величины диапазона перемещения и площади обкладок датчики имеют различную чувствительность. Типоразмеры различаются площадью металлизированных рабочих площадок обкладок емкостных преобразователей.

Емкостной датчик является нелинейным преобразователем, т. к. емкость конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между обкладками. При расстояниях между обкладками от единиц до нескольких десятков микрон чувствительность, как отношение приращения емкости к величине перемещения, становится достаточной для измерения нанометровых перемещений. В то же время, если расстояние между пластинами становится меньше определенного порога (для датчиков с диапазоном 100 мкм – порог составлял 10 мкм), то чувствительность нарастает непредсказуемо быстро, что затрудняет измерения (см. рис. 1, область А).



Рис. 1. Выбор диапазона измерения емкостного датчика с учетом нелинейности

С другой стороны, рабочая область (на рис. 1, область Б) ограничена снижением чувствительности при слишком больших расстояниях между обкладками, в результате чего разрешение датчика становится недостаточным для точного позиционирования.

Таким образом, проектирование емкостного преобразователя является нетривиальной задачей, связанной с выбором диапазона достаточной чувствительности и линейности, и увязанных с этим минимального зазора между обкладками и площадью обкладок.

Точность емкостных датчиков зависит, в т. ч. и от геометрических параметров. К ним относятся плоскостность и параллельность поверхностей датчиков, шероховатость поверхностей и параллельность выставления датчиков друг относительно друга. Для устранения геометрических эффектов датчики изготовлены с повышенными требованиями к плоскостности 0,002 мм и к параллельности рабочей поверхности относительно установочной 0,005 мм, параметр шероховатости рабочих металлизированных поверхностей датчиков составляет Ra 0,02 мкм.

Для устранения взаимной непараллельности двух обкладок датчика, выставление кронштейнов с приклеенными к ним датчиками происходит непосредственно при установке их в позиционер с использованием специальных приспособлений и калиброванных мер.

Несовершенство поверхностей датчиков (микро царапины, пики, шероховатость, волнистость), кроме того, служит источником шума (см. рис. 2) [3], затрудняющего однозначное определение расстояния между обкладками.



Рис. 2. Пример выходного сигнала емкостного датчика с учетом шума при подаче на актюатор ступенчатого перемещения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардин, В. А. Датчики для систем нано - и микропозиционирования на основе пьезоактюаторов / В. А. Бардин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне, Пенза, 19–21 мая 2015 г. / под ред. М. А. Щербакова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – С. 220.

2. Бардин, В. А. системы управления высокоточными устройствами позиционирования на основе пьезоэлектрических актюаторов / В. А. Бардин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – С. 169.

3. Сайт фирмы Physik Instrumente (PI) [Электронный ресурс]. URL: <u>http://www.physikinstrumente.com</u>.

УДК 621.33/621.8-1/-9 СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ АКТЮАТОРАМИ

А. И. БУРАНОК, Я. С. КРОТ, А. И. ПАВЛЕНКО

ОАО «Оптоэлектронные системы» Минск, Беларусь

UDC 621.33/621.8-1/-9 DEVELOPMENT AND APPLICATION OF COORDINATE SYSTEMS WITH PIEZOELECTRIC ACTUATORS *A. I. BURANOK, Y.S. KROT, A. I. PAVLENKO*

Аннотация

В данной работе освещена проблематика создания координатных устройств для микро - и нанопозиционирования в сканирующих системах на базе пьезоэлектрических актюаторов, существующие на данный момент конструктивные решения в этой области и достигнутые в процессе опытно-конструкторской работы характеристики.

Ключевые слова:

атомно-силовая микроскопия, координатная система, нанопозиционирование, пьезокерамика, пьезоактюатор, флексор, емкостной датчик.

Abstract

This paper reveals the problem of creating coordinate devices for micro- and nano-positioning in scanning systems based on piezoelectric actuators, current constructive solutions in this field and the characteristics obtained in the process of research and development work.

Key words:

atomic force microscopy, coordinate system, nanopositioning, piezoceramics, piezoactuator, flexor, capacitive sensor.

Введение

Развитие методов технологического контроля в микроэлектронике происходит от визуального контроля микро - и макродефектов, измерения размеров элементов в плоскости к контролю пространственных дефектов и размеров менее 0,5 мкм, характеризующих трехмерную конфигурацию микрорельефа топологических структур.

Контроль элементов топологии с размерами менее 0,35 мкм оптическими методами становится невозможным. Используемый для анализа микрорельефа метод растровой электронной микроскопии позволяет получить требуемое разрешение, однако он имеет ряд ограничений в применении для оперативного контроля в условиях серийного производства. В частности, этот метод используется в условиях вакуума, относится к разряду разрушающего контроля и требует специальной подготовки образцов при контроле пространственных параметров, что снижает эффективность его использования в производственных условиях.

Метод атомно-силового зондового сканирования позволяет проводить контроль конфигурации профиля топологии с субмикронными размерами: латеральным (горизонтальным) разрешением от 1 до 10 нм и вертикальным разрешением от 0,1 до 0,5 нм. Это метод неразрушающего контроля, который не требует специальной подготовки образцов и вакуума, может применяться в условиях «чистых зон».

Важнейшим устройством современных аналитических комплексов атомно-силового зондового сканирования является координатная система позиционирования, построенная, как правило, с использованием пьезоэлектрических актюаторов (пьезоактюаторов), позволяющих реализовать микроперемещения с высоким быстродействием и разрешением.

Описание конструктивных особенностей

Актюатор – механическое или электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в действие механизмов, систем или управления ими с использованием генерируемой силы или движения (перемещения).

Пьезоэлектрический актюатор (пьезоактюатор) – устройство, использующее способность пьезокерамики расширяться под воздействием электростатического поля, для генерирования силы и перемещения в микрометровом диапазоне [1].

Использование пьезоактюаторов позволяет проектировать системы перемещения, способные двигаться с минимальным шагом до 1 нм непрерывно, ступенчато, с высокой скоростью реагирования на управляющий сигнал.

Координатные системы позиционирования выступают как самостоятельные узлы или являются неотъемлемой частью сканирующих зондовых микроскопов или интерферометров. Наилучших характеристик (линейность перемещения, минимальная дискретность, оптимальное быстродействие, наличие обратной связи по положению и т. д.) можно добиться, разрабатывая координатные системы позиционирования под конкретные конструкции сканирующих зондовых микроскопов. Было принято решение о разработке линейки координатных систем для субмикронного позиционирования и сканирования с диапазонами перемещения по координатам 10, 20 и 2 мкм.

На сегодняшний день такие координатные системы проектируют на базе флексорных механизмов, приводимых в движение пьезоактюаторами.

Флексоры – это устройства, не имеющие трения и мертвого хода, принцип работы которых основан на упругой деформации (флексинге) твердого материала, например, стали или дюралюминия. У них полностью отсутствует скольжение и качение. Пьезоактюаторы характеризуются способностью генерировать большие силы при перемещении, но зачастую малой величиной максимального перемещения и сильно колеблющейся прямолинейностью перемещения. Флексорные позиционирующие устройства применяются в тех случаях, когда требуется получить исключительно прямое перемещение по одной и более осям с нанометрическим отклонением от идеальной траектории [2].

На рис. 1 изображен простейший механизм, предназначенный для безлюфтового прямолинейного перемещения, выполняющий роль упругих направляющих для пьезоактюатора. Отклонение перемещения столика (б) от прямолинейности обратно пропорционально отношению величины перемещения к длине рычагов. В проектируемой линейке позиционеров конструктивно удалось добиться величин прямолинейности перемещения в пределах 10 нм.



Рис. 1. Пример четырехзвенного механизма на основе флексоров вместо шарниров: а – пьезоактюатор; б – предметный столик; в – флексорные рычаги

Проектирование флексоров рычажного типа так же позволяет расширить диапазон перемещения координатой. Пьезоактюаторы современных производителей обладают величинами блокирующей силы не менее 800–1200 H, но диапазоном перемещения не более 20–32 мкм согласно анализу характеристик продукции фирмы Physik Instrumente (Германия) [3] и АО "НИИ "Элпа" (РФ) [4]. Это открывает возможности проектирования систем преобразования движения с передаточными отношениями 1:2 – 1:4 для получения требуемого диапазона перемещения в 100 мкм без ущерба для развиваемых при перемещении усилий (с учетом потерь на упругие деформации запас развиваемого усилия составляет не менее 50–100 H). На рис. 2 показан способ расширения диапазона перемещения и сканирования координатной системы с использованием рычага, при этом увеличение пропорционально отношению длины плеча столика (е) к плечу приложения силы (д).



Рис. 2. Пример четырехзвенного механизма с использованием плеча приложения силы для увеличения диапазона перемещения: а – пьезоактюатор; б – предметный столик; в – флексорные рычаги; д – плечо приложения силы; е – плечо столика

Еще одна функция, выполняемая флексорами – предварительное нагружение пьезоактюаторов. Благодаря инертности массы пьезоактюатора (включая любую дополнительную нагрузку на него), быстрое перемещение будет генерировать силу (сжатия или растяжения), действующую на пьезоэлемент. На высоких частотах работы системы силы инерции, действующие на растяжение, могут приближаться к максимально допустимым для пьезоактюатора. Сила растяжения может быть компенсирована за счет использования предварительного механического напряжения [1]. Величина силы предварительного напряжения должна быть на уровне 20 % от предельной величины сжимающей нагрузки.



Рис. 3. Пример четырехзвенного механизма в сочетании с рычажным усилителем, создающим предварительное нагружение: а – пьезоактюатор; б – предметный столик; в – флексорные рычаги; д – плечо приложения силы; е – плечо столика На рис. 3 показана схема расположения рычагов, в которой реализованы три требования к флексорным механизмам координатных систем: прямолинейность перемещения по координате за счет упругих направляющих, расширение диапазона перемещения за счет рычажного флексорного механизма, предварительное нагружение за счет упругости флексорного механизма. В данном случае механизм работает как пружина предварительного нагружения, но для повышения жесткости механизма могут применяться и дополнительные пружины. Схема на рис. 3 выбрана как основа проектирования линейки координатных систем субмикронных перемещений.

Немаловажным фактором при проектировании координатных систем является быстродействие системы. Координатная система позиционирования для атомно-силового зондового сканирования должна не только отрабатывать перемещения с минимальным шагом в 1 нм, но также должна проводить сканирование поверхностей в режиме «старт-стоп» на высоких скоростях. Внутренней характеристикой пьезоактюатора и систем на его основе, ограничивающей быстродействие сканирования, является собственная частота резонанса. При обходе траектории сканирования в режиме «старт-стоп», флексорная система подвергается вынужденным колебаниям с частотой, равной частоте срабатывания пьезоактюатора на шаг сканирования. При значениях частот вынужденных колебаний близких к частоте собственных колебаний пьезоактюатора, помимо силы инерции угрожающей разрушить пьезокерамику растягивающим импульсом, наблюдается резонанс механических колебаний в виде быстрого нарастания величин перемещения актюатора, не соответствующих управляющему сигналу. Кроме того, собственной частотой колебаний обладает так же флексорная система вследствие собственной массы и упругости. При частотах сканирования, близких к собственной частоте флексора, наблюдается потеря механического контакта между флексором и пьезоактюатором, что приводит к соударениям и быстрому износу и разрушению пьезокерамики. Повышение скорости сканирования требует повышения жесткости флексорной системы и уменьшения собственной массы пьезокерамики и флексора. В то же время повышение жесткости резко снижает диапазон перемещения пьезоактюатора. Это техническое противоречие решается компромиссом между диапазоном перемещения подвижной платформы и собственной резонансной частотой системы под конкретные требования атомно-силовой сканирующей установки.

Для определения позиции актюатора или перемещаемой платформы с высокой точностью в разрабатываемых системах используется прямая метрология на основе бесконтактных датчиков. Наиболее перспективным решением для измерений координат вдоль оси перемещения является применение двух пластинчатых емкостных датчиков, установленных непосредственно на подвижную платформу координатной системы. Разрешающая способность и повторяемость в этом случае может достигать 1 нм. Сигнал с емкостных датчиков может быть использован как обратная связь в системе управления статическим положением перемещаемой платформы координатной системы, и служить для упреждающей компенсации нелинейности перемещения, вызванной гистерезисом пьезокерамики и кинематикой рычажных флексорных механизмов.

Области применения разрабатываемых на данный момент координатных систем позиционирования:

- сканирование образцами или устройствами;

- позиционирование образцов или устройств;

- сканирование образцов в сканирующих зондовых микроскопах;

- микроманипулирование;

– интерферометрия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Панич, А. Е.** Пьезокерамические актюаторы / А. Е. Панич. – Ростов н/Д : РГУ, 2008.

2. Бардин, В. А. Системы управления высокоточными устройствами позиционирования на основе пьезоэлектрических актюаторов / В. А. Бардин. – Пенза : ПГУ, 2015.

3. Сайт Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Germany, www.physikinstrumente.com.

4. Сайт АО "НИИ "Элпа", РФ, http://www.elpapiezo.ru.

УДК 004.932.2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В МИКРОСКОПИИ

А. А. ГУНДИН, В. Г. ДУДОРОВ

ОАО «Оптоэлектронные системы» Минск, Беларусь

UDC 004.932.2 METHOD OF CONDUCTING SUB-PIXEL MEASUREMENTS OF OBJECTS IN MICROSCOPY A. A. HUNDZIN, V. G. DUDOROV

Аннотация

В данной статье решается задача измерения линейных размеров с субпиксельной точностью для элементов полупроводниковых пластин в микроскопии. Рассмотрен метод измерения с помощью анализа профиля сечения изображения, содержащего края объекта с применением метода взвешенных сумм. Описан предлагаемый метод статистической оценки и удаления аномальных результатов для множества однотипных измерений с целью повышения устойчивости алгоритма.

Ключевые слова:

измерение, контроль линейных размеров, обработка изображений, микроскопия, субпиксельная точность.

Abstract

In this paper, the problem of measuring linear dimensions with sub-pixel accuracy for elements of semiconductor wafers in microscopy is solved. The method of measuring the cross section of an image containing the edges of an object using the weighted sum method is considered. A proposed method of statistical estimation and removal of anomalous results for a set of one-type measurements is described with the aim of increasing the stability of the algorithm.

Key words:

measurement, linear dimensions control, image processing, microscopy, subpixel precision

Введение

В современной микроскопии одной из важнейших функций в сопровождающем программном обеспечении (ПО) является возможность проведения измерений наблюдаемых объектов.

Данная функция в подавляющем большинстве реализуется путем наложения «измерительного» слоя поверх изображения, другими словами, реализуется возможность рисовать примитивы поверх изображения, используя длины линий и переводной коэффициент для получения размеров объектов (метод измерений по длине линии). Недостатком такого подхода является достаточно высокая абсолютная погрешность получаемого результата.

Актуальным является вопрос автоматического нахождения границ объекта средствами ПО, позволяя существенно уменьшить вклады субъективной, статической, мультипликативной и случайной составляющих погрешности.

Целью работы является разработка программного кода алгоритма для проведения измерений объектов на основе анализа изображений, полученных камерой, с субпиксельной точностью.

Рассмотрим основные этапы проведения субпиксельных измерений с использованием оптического микроскопа.

Преобразование цветного изображения в полутоновое

При работе микроскопа в видимой области спектра, по умолчанию, изображение с камеры для обработки приходит цветным. Однако в данном случае цветовая составляющая никак не влияет на точность нахождения края. Поэтому первым делом необходимо осуществить преобразование RGB изображения в градации серого.

В простейшем случае формулой получения значения пикселя «серого» изображения из цветного является среднее значение интенсивности всех цветовых каналов.

Однако в виду неравномерности восприятия цвета глазом, более правильно применять усреднение с весовыми коэффициентами [1]:

$$I = R*0,333 + G*0,5 + B*0,166$$
,

где I – значение интенсивности пикселя «серого» изображения; R,G,B – значения интенсивности пикселя на каждом из каналов цветного кадра.

Нахождение границ объекта

Визуально объект всегда выделяется на фоне, поскольку его граница либо темнее, либо светлее фона. Т. е. объект контрастирует с фоном. Это говорит о том, что в окрестности границы объекта обязан быть существенный перепад яркости изображения.

Поскольку изображение имеет 256 градаций яркости (8-битный формат пикселя), то переход от фона к объекту является не ступенчатой функцией, а плавно возрастающей (рис. 1).



Рис. 1. Модель идеального и реального края

В этом случае для однозначного нахождения границ объекта необходимо взять производную функции по интересуемой части изображения.

$$dx_i = \frac{I_i - I_{i-1}}{h},$$

где I – яркость текущего пиксела; h – шаг равный 1 пикселю.

В результате границами объекта будут экстремумы функции производной интенсивностей пикселей.

Чтобы не реагировать на локальные экстремумы (шум, пыль), необходимо применить пороговое значение (обозначим как Т) уровня яркости, производная ниже которого будет приравниваться к нулю.

Измерение линейных размеров наблюдаемого объекта с субпиксельным разрешением

Полученные в п.2 экстремумы представляют собой функции, распределённые на некоторой длине профиля (ряд пикселей по которому ведется анализ изображения). Используя это, можно применить метод Взвешенных Сумм (Center of Gravity) [2].

$$X = \frac{\sum_{i=0}^{N} |dx_i - T| * i}{\sum_{i=0}^{N} |dx_i - T|},$$

где dx_i – значение производной, рассчитанной на 2-м шаге алгоритма (нахождение границ объекта); Т – величина порога.

К полученному значению X прибавляем смещение от нулевой точки, и разность $X_1 - X_2$ есть результат измерения линейного размера с субпиксельным разрешением.

На рис. 2 показан результат измерения ширины токопроводящей дорожки на кристалле полупроводниковой пластины. Изображение получено с помощью микроскопа Микро-200(Т)-01. Зелёный график – значение интенсивности профиля, красный – её производная, синий пунктир – установленный порог. Вертикальные линии проведены по найденным по методу взвешенных сумм краев объекта. Значения на графике по оси абсцис указаны в пикселях, по оси ординат – в интенсивностях 8-битного формата пикселя.



Рис. 2. Получение линейного размера объекта

Повышение разрешения с помощью обработки соседних профилей, образующих зону обработки изображения

Уменьшить влияние шумов на результат измерений можно путем усреднения результатов с рядом параллельных соседних профилей. Сильно зашумлённое изображение можно также предварительно обработать фильтром Гаусса.

Применим на данное измерение толщину профиля в 5 пикселей и сглаживание с окном в 3 пикселя (рис. 3).





Проанализировав полученный график, можно сделать вывод о существенном подавлении шума (коэффициент подавления более 3). А вычисленный средний размер ширины дорожки отличается от локального размера на 0,552 пикселя.

Кроме этого, погрешность полученных вычислением результатов можно уменьшить иным путем. Для этого необходимо взять зону множества профилей с некоторым шагом (3–5 пикселя) и усреднить полученные значения (рис. 4). Это позволит решить проблему измерения среднего значения ширины объекта, исключив фактор неровности края.

На рис. 4 показан график полученного множества измерений расстояния по 65 параллельным профилям. Как можно видеть из графика, отклонение результатов измерений не превышает 0,5 пикселя.



Рис. 4. В верхней части измеряемый объект, в нижней – график разброса результатов множества измерений

Однако на изображении некоторых объектов могут присутствовать артефакты, искажающие профиль объекта (рис. 5), в связи с чем возникает вопрос об удалении результатов вычислений связанных с ними.

В разрабатываемом алгоритме применён критерий Граббса [3] для удаления выбросов результатов вычислений связанных с артефактами.

$$G_i = (X_i - \overline{X})/S$$

где X_i – i-е значение результата измерения линейного размера в выборке; $\overline{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_i$ – среднее значение результата; $S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X})^2}$ – среднеквадратическое отклонение результата.

Полученный массив G сортируется по возрастанию величины результата. Крайние элементы массива считаются выбросами, если его значение превышает критическое (в соответствии с заданным уровнем значимости а)



Рис. 5. Измерение объекта со значительным дефектом края

Заключение

Результатом работы является методика измерения объектов с субпиксельным разрешением на изображениях, полученных на микроскопе Микро-200(Т)-01 в условиях реальной эксплуатации. Рассмотренный подход позволяет значительно снизить погрешность оценки линейных размеров объектов в сравнении с классическим методом измерения по длине линии. Он также позволяет в автоматическом режиме обнаруживать изменение положения и размер объекта в видеопотоке, производя перерасчёт результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kumar, T.** A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image // T. Kumar, K. Verma // International Journal of Computer Applications. $-2010. - N \ge 7$. -P. 7-10.

2. Осадчий, И. С. Метод субпиксельного измерения координат изображений звезд для приборов астроориентации космического базирования / И. С. Осадчий // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 5. – URL: <u>http://jre.cplire.ru/jre/may15/1/text.pdf</u>.

3. Лемешко, Б. Ю. Расширение области применения критериев типа Граббса, используемых при отбраковке аномальных измерений / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко / Измерительная техника. – 2005. – № 6. – С. 13–19.

УДК 53.097 НЕЛИНЕЙНОСТЬ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ СКАНЕРОВ-ПОЗИЦИОНЕРОВ СКАНИРУЮЩИХ ЗОНДОВЫХ МИКРОСКОПОВ И ЕЕ КОМПЕНСАЦИЯ ПОСРЕДСТВОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

И. А. КАЧАН, Н. А. ЮРИН

ОАО «Оптоэлектронные системы» Минск, Беларусь

UDC 53.097

NON-LINEARITY OF THE PIEZOCERAMICS OF SCANER-POSITIONERS OF SCANNING PROBE MICROSCOPES AND ITS COMPENSATION BY CLOSE LOOP FEEDBACK *I. A. KACHAN, N. A. YURING*

Аннотация

Атомно-силовой микроскоп (ACM) – устройство способное воспроизводить топографию поверхности образца с очень большим разрешением, вплоть до атомного уровня. Ранние ACM при сканировании поверхности работали в режиме без обратной связи. Это приводило к погрешностям восстановления изображения поверхности из-за присущих артефактов пьезостола (гистерезис, нелинейность, ползучесть, температурный дрейф). Сегодняшние ACM используют обратную связь для минимизации эффектов гистерезиса, ползучести, температурного дрейфа. В данной работе приведены подходы к реализации коррекции нелинейности пьезостола при сканировании в направлениях XY, использующиеся в сканирующем зондовом микроскопе C3M-200.

Ключевые слова:

емкостно-цифровой преобразователь, нелинейность, артефакты.

Abstract

The Atomic Force Microscope (AFM) – is a device capable of reproducing the topography of sample surface with extremely high resolutions, up to the atomic level. Early AFMs were operated in open loop. As a result, they were susceptible to piezoe-lectric creep, thermal drift, nonlinearity, hysteresis. These effects tend to distort the generated image. Recently a new generation of AFMs are equipped with feedback close loops that work to minimize the adverse effects of hysteresis, piezoelectric creep and thermal drift. In this paper we illustrate approaches to the implementation of the correction of the piezoelectric nonlinearity when scanning in the XY directions that uses in scanning probe microscope SPM-200.

Key words:

capacity-digital converter, non-linearity, artefacts.

Введение

Электронная промышленность в настоящее время испытывает потребность в контроле интегральных микросхем с нанометровой топологией.

Существует проблема, сдерживающая разработку и изготовление интегральных схем с топологическими элементами в нанометровом диапазоне размеров, решая которую неприменимо использовать традиционные оптические методы для контроля линейных размеров по пространственным координатным осям. Сканирующая зондовая микроскопия, в частности атомно-силовая микроскопия (ACM), в отличие от оптических и электронных микроскопов, позволяет получать трехмерные изображения поверхности образцов в реальном пространстве от атомных размеров до десятков микрон.

При производстве микросхем контроль линейных размеров является одной из основных технологических операций и ACM выступает здесь как метрологическое средство измерения геометрических характеристик рельефа. В связи с этим следует уделить особое внимание изучению артефактов и их последующего исключения из измерений. Главными источниками погрешностей и ошибок являются нелинейность преобразований в аппаратной части прибора (игла-кантилевера, образец, пьезосканер) и нелинейность, заложенная в числовых алгоритмах программного обеспечения микроскопа [1].

Целью работы является аппаратно-программная реализация коррекции нелинейности движения пьезосканера в направлении XY.

Пьезоэлектрическая керамика

Для перемещения иглы кантилевера на малые расстояния в C3M-200 используются пьезоэлектрические двигатели. В большинстве случаев пьезоэлектрические двигатели работают с использованием обратного пьезоэффекта.

В СЗМ в качестве пьезоматериала используется пьезокерамика, обладающая высоким пьезомодулем. Пьезокерамика состоит из монокристаллических зерен с типичным размером 0,5–50 мкм.

Химический состав большинства пьезокерамик представляет собой $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ (цирконат-титанат свинца, ЦТС) с различными добавками. В качестве добавок используются Nb, Sn, Bi, La – легирующие добавки (менее 5 %) и Sn, Ba, La – модифицирующие примеси (более 5 %). В неполярной керамике зерна и, соответственно, полярные оси их доменов ориентированы хаотично, что обуславливает ее квазиизотропное поведение. Для получения необходимых свойств (обратный пьезоэффект), необходимо произвести поляризацию пьезокерамики [2]. Этот процесс заключается в нагреве материала до температур выше температуры Кюри T_c и последующем охлаждении во внешнем электрического поля в материале остается остается остаточная поляризация [3]. При дальнейшем использовании пьезокерами-

ки осуществлять ее нагрев выше точки Кюри нельзя, т. к. при этой температуре пьезокерамика деполяризуется. В СЗМ-200, выпускаемом ОАО «Оптоэлектронные системы», пьезокерамика выбрана от производителя Physik Instrumente(PI).

В идеальном случае механическое напряжение в пьезокерамике линейно зависит от прикладываемого электрического потенциала:

$$\sigma = d^*E,$$

где σ – механическое напряжение; Е – напряженность электрического поля; d –коэффициент деформации [4]. Коэффициент деформации является характеристикой данного пьезоэлектрического материала. На практике механическое напряжение пьезоэлектрической керамики на приложенное электрическое поле отличается от идеальной линейной по причине наличия таких негативных явлений, как собственная нелинейность, гистерезис, ползучесть (крип), температурный дрейф, старение пьезокерамики. Нелинейность пьезокерамики приводит к тому, что объекты одинакового размера в начале и в конце сканируемого образца будут иметь различные линейные размеры.

Корректировка нелинейности пьезокерамики

Существует несколько способов коррекции нелинейности пьезокерамики в СЗМ.

Наиболее надежный, но и наиболее дорогостоящий подход к решению этой проблемы заключается в прямом измерении мгновенного положения сканера и коррекции нелинейности в режиме реального времени посредством цепи обратной связи. В качестве датчиков смещения в C3M-200 используются емкостные преобразователи перемещения [5].

Наиболее простой способ заключается в использовании нелинейных напряжений возбуждения пьезокерамики так, чтобы результирующее смещение сканера было приблизительно линейным. Для этого СЗМ сканер должен быть предварительно откалиброван, т. е. найдена функция смещения Δl от приложенного напряжения U: $\Delta l = f(U)$. Калибровку сканера осуществляют с использованием образцов, имеющих периодические структуры с известными размерами.

В данной работе был использован наиболее надежный способ, т. е. с использованием цепи обратной связи. На рис. 1 представлена структурная схема цепи обратной связи.



Рис. 1. Структурная схема цепи обратной связи коррекции нелинейности пьезокерамики

Программная коррекция нелинейности заключается в математическом описании формы кривой движения пьезостола. Для этого в большинстве случаев описывают полиномом n-степени. В СЗМ-200 используется коррекция нелинейности полиномом 3 степени.

На рис. 2 представлено движение сканера по заданной оси при подаче управляющего напряжения треугольной формы с использованием (без использования) программной нелинейной коррекции полиномом 3 степени.



Рис. 2. Движение без коррекции (слева) нелинейности, движение с коррекцией (справа) нелинейности

При недостаточности вычислительных ресурсов ядра формировать управляющие потенциалы для управления пьезостолом можно без аппроксимации полиномом. Для этого развертка по ЦАП изменяется итеративно так, что за n-ое число итераций движение сканера станет линейным.

На рис. 3 приведены результаты итеративной коррекции нелинейности, т. е. разность между линией (к которой необходимо приближаться) и реальной кривой. Из графика видно, что уже за 10–11 итераций разность между линией (к которой нужно приближаться) и реальной кривой стремится к нулю. Реальная кривая получается при каждом прямом ходе пьезостека и представляет собой результаты измерений емкостно-цифрового преобразователя.



Рис. 3. Разностная кривая между идеальной и реальной кривой

Заключение

Реализован аппаратно-программный способ коррекции нелинейности пьезостола в направлениях ХҮ в микроскопе СЗМ-200. Полученные алгоритмы позволяют значительно повысить точность позиционирования пьезосканера в плоскости ХҮ, минимизировав разницу шага между точками измерения в матрице сканирования в различных ее областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Certus Standard.Сканирующий зондовый микроскоп с оптическим видеомикроскопом. – Россия : ООО «Нано Скан Технология», 2011. – 141 с.

2. Peter Eaton, Paul West. Atomic force microscopy// Oxford University Press. – 2010.

3. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород : ИФМ РАН, 2004. – 114 с.

4. **Тихомиров, А. А.** Основы сканирующей зондовой микроскопии и методы ее применения в современных научных исследованиях /А. А. Тихомиров // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ». – 2009. – №4.

5. 2010Saint Jean M., Hudlet S., Guthmann C., Berger J.Van der Waals and capacitive forces in atomic force microscopies // J. Appl. Phys. – 1999. – v.86(9). – P. 5245–5248.

УДК 621.891:621.316 ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫМ МЕТОДОМ

С. В. КОРОТКЕВИЧ, О. В. ХОЛОДИЛОВ

РУП «Гомельэнерго» УО «Белорусский государственный университет транспорта» Гомель, Беларусь

UDC 621.891:621.316 EVALUATION OF THE THICKNESS OF A LUBRICANT LAYER IN BEARINGS ELECTRORESISTIVE METHOD S. V. KOROTKEVICH, O. V. KHOLODILOV

Аннотация

Описана методика оценки толщины граничного смазочного слоя, основанная на измерении его электрического сопротивления. Приведены расчетные соотношения, подтвержденные результатами эксперимента. Данный метод может быть использован для диагностирования состояния поверхностей качения колец подшипников в процессе эксплуатации, осуществления входного контроля качества изготовления и сборки, ремонта, а также для оценки триботехнической эффективности и эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов, используемых в подшипниках.

Ключевые слова:

подшипник качения, пластичный смазочный материал, граничный смазочный слой, электрическое сопротивление, сопротивление стягивания, туннельная проводимость, теория Герца.

Abstract

The described method of estimating the thickness of the boundary lubricant layer, based on measuring its electrical resistance. Shown the calculated ratios supported by the results of the experiment. This method can be used for condition diagnostics of rolling surfaces of bearing rings in the process of operation, the implementation of the input quality control of manufacturing and Assembly, repair, and estimation of the tribotechnical effectiveness and operational properties of grease used in bearings.

Key words:

rolling bearing, grease, boundary lubrication layer, electric resistance, contraction, tunneling conductivity, Hertz theory.

Для обеспечения работоспособности триботехнических систем, например, подшипников качения, необходимо обеспечить минимальные толщины смазочной пленки, обеспечивающей гидродинамические условия смазывания. Существуют различные методы измерения толщины смазочной пленки [1, 2]. Реальный контакт твердых тел, работающих в режиме граничной смазки, можно описать с помощью моделей поверхности раздела, которые могут иметь место с учётом наличия на поверхности металлов оксидных плёнок. При наличии в зоне контакта сплошной смазочной прослойки толщиной d, его сопротивление определяется в основном туннельной проводимостью:

$$R_0 == \left(\frac{10^{-14}}{a^2 \varphi^{0,5}}\right) \exp(10,24\varphi^{0,5}d),$$

где ϕ – эффективная работа выхода электрона; *a* – радиус пятна контакта; *d* – толщина смазочного слоя.

Применение расчетных соотношений теории стягивания и туннельной проводимости к анализу экспериментально полученных значений контактного сопротивления позволяет оценивать толщину (нанометрового диапазона) пленок, разделяющих контактирующие тела.

Цель исследований – разработать метод оценки толщины граничного смазочного слоя (ГСС), основанный на измерении его электрического сопротивления.

Методика испытаний

При исследовании граничного трения вопрос об определении фактической площади контакта трущихся тел имеет ключевое значение. В связи с тем, что заранее сформировать площадь контакта в динамически нагруженном подшипнике невозможно, представляет интерес использование электрорезистивного метода для оценки толщины ГСС.

В качестве объекта исследования был взят подшипник качения ZVL6302/16 (Словакия) с внешним диаметром кольца 42 мм, внутренним – 16 мм, ширина колец – 13 мм, диаметр шариков – 8 мм, количество шариков – 7 шт., ширина дорожки внутреннего и внешнего колец – 6 мм.

Подшипник промывался в ацетоне и керосине, высушивался и заполнялся исследуемым смазочным материалом (СМ). Для каждого нового СМ брался новый подшипник. В качестве СМ использовались Prolong (США) с противозадирными добавками ЕР (extremal pressure); МРУС-4; Литол-24; 158М; Солидол.

Результаты исследований и их обсуждение

Расчет номинальной площади контакта сопряжённых тел осуществляется из соотношений классической теории Герца. Площадь контакта S шарика с кольцом подшипника составляет эллипс с полуосями a^* и b (рис. 1), где большая полуось a^* направлена перпендикулярно дорожке качения (направлению качения).



Рис. 1. Схема контакта шарика с кольцом в подшипнике

Радиус пятна контакта шара с плоскостью *a** определяется величиной нагрузки, механическими свойствами тел и их геометрическими размерами и оценивается из соотношений для упругой деформации тел:

$$a^* = 1,1 \ln \left(\frac{NR}{E}\right)^{1/3}$$

где *N* – нагрузка; *R*, *E* – эффективный радиус и модуль упругости, соответственно.

Эффективный радиус *R* рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_2} \pm \frac{1}{R_1},$$

где R_1 и R_2 радиусы контактирующих тел, знак плюс «+» берётся при котакте выпуклых тел, а знак минус «-» при контакте цилиндра и соответствующей цилиндрической выемки. Так как кольца и шарики изготовлены из одного материала (подшипниковая сталь типа ШХ 15), то эффективный модуль равен модулю упругости стали – $2,6 \cdot 10^{11}$ Па. Рассчитанный эффективный радиус R для внешнего и внутреннего колец составляет $3,3 \cdot 10^{-3}$ и $2,8 \cdot 10^{-3}$ м соответственно. Рассчитанные значения радиуса пятна касания a^* в зависимости от нагрузки N для схемы шарик–плоскость приведены в табл. 1, где P_{cp} – среднее контактное давление.

Табл. 1. Расчётные значения радиуса пятна касания a^* , среднего контактного давления $P_{\rm cp}$, сопротивлений стягивания $R_{\rm s}$, оксидной плёнки $R_{\rm ok}$, общего R

<i>N</i> , H	<i>а*</i> , мкм	<i>S</i> , 10 ⁻¹² м ²	<i>P</i> _{ср} , ГПа	<i>R</i> _s , мОм	$R_{\rm ok}$, мОм	<i>R</i> , мОм
20	74,90	17 615	1,1	2,00	56,8	58,8
100	128,10	51 526	1,9	1,20	19,4	19,6
200	161,30	81 696	2,5	0,90	12,2	13,1
400	203,30	129 779	3,1	0,74	7,7	8,4
600	232,70	170 029	3,5	0,64	5,9	6,5
800	256,10	205 944	3,9	0,58	4,9	5,5
1000	275,80	238 846	4,2	0,54	4,2	4,7
1200	293,10	270 118	4,4	0,51	3,7	4,2
1400	308,50	298 841	4,7	0,49	3,3	3,8
1600	322,60	326 782	4,9	0,47	3,1	3,6
1800	335,45	353 387	5,1	0,45	2,8	3,3
2000	347,40	378 956	5,3	0,43	2,6	3,0

Сопротивление стягивания R_s рассчитывается по формуле

$$R_{\rm s}=\frac{\rho}{2a^*},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление стали равное $3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.

Сопротивление R_{ok} с учётом наличия оксидной плёнки рассчитывается по формуле

$$R_{\rm ok} = \frac{\sigma}{S}$$

где σ – удельное поверхностное сопротивление оксидной плёнки стали равное 10^{-9} Ом·м².

С учётом того, что шарик контактирует с внутренним и внешним кольцами подшипника, величина сопротивления стягивания, оксидной плёнки будет равна сумме соответствующих сопротивлений:

$$R_{s} = R_{\text{s BHyt}} + R_{\text{s BHem}} ;$$

$$R_{\text{ok}} = R_{\text{ok BHyt}} + R_{\text{ok BHem}} ;$$

$$R = R_{\text{BHyt}} + R_{\text{BHem}} .$$

В табл. 2 приведены результаты расчета некоторых параметров подшипников качения. Следует отметить, что они носят приближенный характер. Это связано, одной стороны, с экспериментальной оценкой длин отпечатков, а с другой, с использованием соотношений теории Герца, где рассматриваются идеально гладкие поверхности, без учёта шероховатости сопряжённых тел, в нашем случае колец и шариков подшипника.

	a	a*	h	h	S	S	р	Р	R	Rм	R
<i>N</i> , H	<i>u</i> ,	<i>u</i> ,	U _{BHYT}	<i>U</i> _{внеш} ,	10^{-10} x^2	10^{-10} x^2	Г _{внут,}	г _{внеш} ,	$\Lambda_{\rm s},$		Λ
	МКМ	МКМ	МКМ	МКМ	10 M	10 M	1 1 1a	1 1 la	мОм	Uм	мОм
	74,9	299,6	69,4	70,0	653	659	0,31	0,30	1,00	30,5	31,5
										0	
100	128,1	512,4	113,8	120,2	1831	1934	0,55	0,50	0,60	10,7	10,3
										0	
200	161,3	645,2	143,3	151,4	2903	3067	0,69	0,65	0,40	6,70	7,1
400	203,3	813,2	180,5	190,7	4609	4869	0,90	0,80	0,36	4,30	4,7
600	232,7	930,8	206,6	218,2	6038	6377	1,00	0,94	0,32	2,27	3,6
800	256,1	1024,4	227,4	240,2	7315	7726	1,10	1,00	0,30	2,69	2,9
1000	275,8	1103,2	244,9	258,7	8483	8961	1,20	1,10	0,28	1,32	2,6
1200	293,1	1172,4	260,3	274,9	9583	10120	1,25	1,20	0,26	2,00	2,2
1400	308,5	1234	274,0	289,4	10617	11214	1,30	1,25	0,24	1,84	2,1
1600	322,6	1290,4	286,4	302,5	11605	12257	1,40	1,30	0,24	1,66	1,9
1800	335,5	1341,8	298,0	314,6	12555	13255	1,43	1,36	0,22	1,55	1,8
2000	347,4	1389,6	308,5	325,9	13461	14220	1,50	1,40	0,22	1,44	1,7
Индексы «внутр.», «внеш.» соответствуют значениям, для внутреннего и внешнего колец											
полшипника соответственно											

Табл. 2. Расчётные значения параметров подшипников качения

Чувствительность схемы при тарировке на 1 Ом составляет 40 мВ падения напряжения, выше 40 мВ чувствительность снижается. Поэтому необходимо увеличивать сопротивление R_2 на порядок или более.



Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления от падения напряжения в контакте при $R_2 = 1$ Ом

В табл. 3 приведены значения регистрируемого в процессе проведения эксперимента падения напряжения и соответствующие им значения туннельного сопротивления в зависимости от толщины *d* ГСС.

Эффективная работа выхода электрона ϕ при толщинах ГСС d = 0.5-1.4 нм составляет 2,025 эВ, а при 1.5-2.0 нм – 1.8 эВ.

Измерение контактного сопротивления осуществлялось с использованием 4-проводной электрической схемы при напряжении U на разомкнутом контакте 50 мВ, что исключает электрический пробой ГСС и протекание электрохимических процессов в зоне контакта [3].

<i>d</i> , нм	<i>R_t</i> , Ом	<i>U</i> , мВ
0,5	0,003	0,1 (при <i>R</i> ₂ = 1 Ом)
0,6	0,006	1,0 (<i>R</i> ₂ = 1 Ом)
0,7	0,030	2,0 (<i>R</i> ₂ = 1 Ом)
0,8	0,100	4,0 (<i>R</i> ₂ = 1 Ом)
0,9	0,800	22,0 ($R_2 = 1$ Ом)
1,0	5,200	42,0 (<i>R</i> ₂ = 1 Ом)
1,1	36,500	48,0–49,0 (<i>R</i> ₂ = 1 Ом)
1,2	397,700	40,0 (<i>R</i> ₂ =10 ² Ом)
1,3	2 939,000	37,5 (<i>R</i> ₂ =10 ³ Ом)
1,4	22 000,000	34,5 (<i>R</i> ₂ =10 ⁴ Ом)
1,5	166 722,000	31,1 (<i>R</i> ₂ =10 ⁵ Ом)

Табл. 3. Зависимость падения напряжения U и туннельного сопротивления R_t от толщины d ΓCC

Необходимо отметить, что точность оценки толщины ГСС, коррелирует с точностью её оценки методом послойного травления в среде аргона и анализа химического состава поверхностного слоя с использованием рентгенофотоэлектронной спектроскопии. Было установлено, что спектры химически активных элементов серы, хлора и фосфора, содержащиеся в составе ГСС, отсутствуют после травления поверхности в течении 600 с при скорости травления 0,1 нм в течении 60 с. Таким образом, толщина ГСС составляет 1 нм, что полностью коррелирует с результатами оценки заявляемого способа.

Методика оценки толщины ГСС включает в себя следующие действия:

1) исходя из соотношений теории Герца, определяем радиус фактического пятна контакта (см. табл. 2);

2) работа выхода электрона ф является известной величиной (приведена в описании) и берется из справочных данных;

3) толщину *d* граничного смазочного слоя (расстояние между электродами) в «нм» задаём сами;

4) таким образом, все параметры, входящие в формулу для расчёта R_t известны;

5) регистрируем в процессе эксперимента значения падения напряжения между валом и внешним кольцом подшипника и определяем величину контактного сопротивления;

6) сравниваем регистрируемую величину контактного сопротивления с рассчитанной и, в зависимости от его абсолютного значения, оцениваем толщину смазочного слоя.

Выводы

Предложенный способ может быть использован для диагностирования состояния поверхностей качения колец подшипников в узлах в процессе эксплуатации, осуществления входного контроля качества изготовления и сборки, ремонта опор качения, а также для оценки триботехнической эффективности пластичных смазочных материалов, используемых в подшипниках и их эксплуатационных свойств. Причем его можно использовать для различных схем контакта: шар-плоскость, ролик-ролик, роликсегмент, ролик-шар и т. д., для которых рассчитываются параметры контакта (радиус пятна контакта, фактическое контактное давление и т. д.) в т. ч. и подшипник качения произвольной конфигурации (роликовый, шариковый и т. д.), а не только игольчатой конфигурации, что существенно расширяет область применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abraham, G. Method for monitoring the conditions of lubrication of tribologic elements / G. Abraham // Proc. of the 5th Intern. Congress on Tribology: Espoo, Finland. Vol. 5: June 12, 1989, P. 1–7.

2. А. с. 1439439 МПК4 G01M 13/04 23.11.1988. Способ измерения толщины смазочного слоя в игольчатых подшипниках и устройство для его осуществления / М. В. Райко и [др.].

3. **Хольм, Р.** Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Изд-во: «Иностранной литературы», 1961. – 464 с.

УДК 620.179.14 ЛОКАЛЬНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ ДВУСЛОЙНЫХ ОБЪЕКТОВ И НОВЫЙ ПАРАМЕТР КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. Н. КОСТИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО, А. В. БЫЗОВ

ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения РАН» Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

LOCAL MAGNETIZATION OF 2-LAYER OBJECTS AND THE NEW PARAMETER OF THE DEPTH TESTING OF THE SURFACE HARD-ENING OF STEEL PRODUCTS V. N. KOSTIN, O. N. VASILENKO, A. V. BYZOV

Аннотация

Проведено конечно-элементное моделирование распределения магнитного поля в двуслойном объекте при намагничивании П-образным электромагнитом. Смоделировано изменение величины упрочненного слоя в контролируемом объекте при помощи образцов различной толщины, располагаемых на магнитомягкой сердцевине. Обнаружена возможность контроля поверхностного упрочнения при измерении значения напряженности магнитного поля в зависимости от толщины упроченного слоя при фиксированном значении магнитного потока.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, контроль поверхностного упрочения, локальное намагничивание, моделирование, напряженность магнитного поля, магнитный поток, П-образный электромагнит, фиксированное значение магнитного потока.

Abstract

The finite-element simulation of the distribution of a magnetic field in the 2-layer object when the magnetizing by U-shaped electromagnet has been carried out.

The change of the thickness of a hardened layer in the tested object by means of plates having various thickness and located on a magnetic soft core has been modeled.

The opportunity of the testing of a surface hardening when measuring the value of the magnetic field strength when the fixed value of the magnetic flux in dependence on the depth of hardened layer has been revealed.

Key words:

non-destructive testing, testing of surface hardening, local magnetization, modeling, magnetic field strength, magnetic flux, U-shaped electromagnet, fixed value of the magnetic flux.

Несмотря на существующее к настоящему времени широкое многообразие методов неразрушающего контроля качества поверхностного упрочнения, среди которых имеются такие методы, как акустические, фототермические, радиационные, наиболее распространенными методами контроля качества упрочнения остаются магнитные методы и коэрцитиметрический метод, в частности.

Хорошо известно, что для того, чтобы раздельно определить и глубину, и твердость упрочненного слоя необходимо дважды в одной и той же точке поверхности измерить среднюю по промагниченному объему величину коэрцитивной силы контролируемого участка изделия с помощью двух приставных преобразователей различных типоразмеров [1]. А это непосредственно заметно увеличивает трудоемкость проведения процедуры контроля. Вследствие изложенного выше, существует необходимость выполнять контроль с помощью одного преобразователя с определением магнитных параметров, которые давали бы независимую информацию о глубине и твердости слоя.

Задачей данной работы являлось определение оптимальных параметров для измерения глубины упрочненного слоя при локальном намагничивании двуслойного ферромагнитного объекта, имитирующего упрочненный твердый поверхностный слой и неупрочненную мягкую сердцевину исследуемого объекта контроля.

В ходе первого этапа работы было выполнено численное моделирование пространственного распределения магнитного поля и магнитного потока в двуслойных объектах. Исследование проводилось путем численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. На рис. 1 графически представлена модель локально намагничиваемого Побразным электромагнитом массивного двуслойного объекта, толщина «упрочненного» слоя D которого в процессе моделирования варьировалась в диапазоне от нуля до 15 мм.

Магнитные свойства слоя, имитирующего поверхностное упрочнение: $H_c = 35 \ A/cm$, $\mu = 40$. Свойства нижнего слоя, имитирующего сердцевину изделия: $H_c = 5 \ A/cm$, $\mu = 200$. Размеры объекта контроля составляли: высота 230 мм, ширина 300 мм, толщина 56 мм. Размеры приставного электромагнита составляли: высота 100 мм, размер полюса 15х28 мм. Магнитодвижущая сила равнялась 1800 Ампер-витков.



Рис. 1. Расчетная модель локально намагничиваемого П-образным электромагнитом массивного двуслойного объекта: 1 – магнитопровод; 2 – обмотки намагничивания; 3 – упрочненный слой; 4 – сердцевина изделия

Результаты моделирования системы «П-образный электромагнитдвуслойный объект» показали, что средняя плотность магнитного потока в «упрочненном» слое остается практически неизменной при увеличении D от нуля до 15 мм. Однако при $D \ge 5 \, MM$ плотность магнитного потока становится неодинаковой на различных глубинах этого слоя, уменьшаясь от верхней к нижней границе. Это различие увеличивается с ростом толщины слоя D. При D = 10 мм величина магнитной индукции B на поверхности и на нижней границе «упрочненного» слоя отличается примерно в 2 раза.

При неизменной величине магнитодвижущей силы электромагнита поле на поверхности намагничиваемого объекта в середине межполюсного пространства монотонно растет с ростом толщины «упрочненного» слоя. Соответствующая зависимость приведена на рис. 2. Исходя из результатов моделирования, возможен контроль глубины упрочненного слоя по величине напряженности магнитного поля, измеряемого на поверхности локально намагничиваемого объекта контроля.

Идея метода, заключающаяся в определения значений напряженности магнитного поля и магнитного потока в изделии, была реализована с помощью аппаратно-программной системы (АПС) магнитной структуроскопии DIUS-1.15M, которая предназначена для многопараметровой структуроскопии ферромагнитных изделий.



Рис. 2. Расчетная зависимость напряженности магнитного поля в межполюсном пространстве электромагнита на поверхности двуслойного объекта от толщины «упрочненного» слоя при фиксированной магнитодвижущей силе

На рис. 3 представлено схематическое изображение приставного измерительного преобразователя системы, помещенного на контролируемое изделие (г). Преобразователь состоит из сплошного П-образного магнитопровода (а) с двумя намагничивающими обмотками (в), отверстиемпреобразователем (б) и двумя датчиками Холла (д). Ширина полюса электромагнита равна 12 мм.



Рис. 3. Схематическое изображение приставного электромагнита с отверстием-преобразователем

С помощью шлифованных пластин различной толщины, изготовленных из закаленной стали 62С2, смоделировано изменение толщины упрочненного слоя на шлифованной плите с размерами 100×170×34 мм, изготовленной из отожженной стали 3.

С помощью AПС DIUS-1.15М были измерены относительные значения напряженности магнитного поля на поверхности двуслойного объекта, после его перемагничивания по нисходящей ветви петли гистерезиса до фиксированного значения магнитного потока, при различной толщине упрочненного слоя.

На рис. 4 представлены зависимости относительной величины напряженности магнитного поля на поверхности двуслойного объекта, после его перемагничивания по нисходящей ветви петли гистерезиса до фиксированного относительного значения магнитного потока (850, 100, -500 мВб), от толщины упрочненного слоя.

Установлено, что зависимость, представленная на рис. 4, при относительном значении магнитного потока, равного 100 мВб, имеет линейновозрастающий характер при увеличении глубины упрочненного слоя.



Рис. 4. Зависимости относительной величины напряженности магнитного поля на поверхности двуслойного объекта, после его перемагничивания по нисходящей ветви петли гистерезиса до фиксированного значения магнитного потока, от толщины упрочненного слоя

В ходе выполнения данной работы в результате численного моделирования была установлена возможность определения глубины упрочненного слоя на поверхности массивной магнитомягкой сердцевины по величине магнитного поля на поверхности локально намагничиваемого объекта. А также было обнаружено, что возможно определять глубину упрочненного слоя по величине магнитного поля, соответствующего заданному значению магнитного потока на нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса. При этом, в отличие от известной коэрцитиметрической методики, диапазон контролируемых толщин может превышать толщину полюсов приставного электромагнита.

Настоящая работа выполнена при поддержке проекта УрО РАН № 15-17-2-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербинин, В. Е. Магнитный контроль качества металлов: монография / В. Е. Щербинин, Э. С. Горкунов. – Екатеринбург: УрО РАН. – 1996. – С 205–206.

E-mail: <u>kostin@imp.uran.ru</u> <u>vasilenko@imp.uran.ru</u> a.v.byzov@mail.ru

УДК 53.082.54 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ БЕЛОГО СВЕТА

И. Н. ФИЛИППОВ, С. С. КУРАЧЕНКО

ОАО «Оптоэлектронные системы» Минск, Республика Беларусь

UDC 53.082.54 DATA PROCESSING METHODS IN WHITE LIGHT SCANNING INTERFEROMETRY I. N. FILIPAU, S. S KURACHENKO

Аннотация

Описан общий принцип работы интерферометра белого света. Приводится обзор основных методов восстановления профиля поверхности по набору интерферограмм. Приводится их сравнительная характеристика. Производится моделирование набора интерференционных картин. Производится восстановление профиля поверхности по модельному набору интерференционных картин. Оцениваются погрешности рассмотренных методов, в зависимости от шумов различной природы.

Ключевые слова:

интерферометрия белого света, измерение профиля поверхности, нахождение пика интерферограммы.

Abstract

Described general principles of scanning white light interferometry. Common methods of profile estimation from white light interferogramms have been reviewed. Comparison of these methods has been performed. Sequence of interferogramms has been modeled. Surface profile has been restored from modeled interferogramms using every described method. Dependency of restoration error from different errors in raw data has been analized.

Key words:

white light interferometry, surface profile measurement, peak detection of interferogramms.

Введение

Метод сканирующей интерферометрии белого света основан на анализе набора интерференционных картин, сформированных двумя пучками света с малой длиной когерентности. Тогда, интерференционная картина на камере хранит информацию об оптической разности хода лучей. Таким образом, перемещая предметный столик вдоль вертикальной оси можно получить набор интерферограмм. Общая схема сканирующего интерферометра белого света изображена на рис. 1.



Рис. 1. Схематичный вид интерферометра белого света на основе объектива Мирау: 1 – интерференционный объектив; 2 – пьезостек; 3 – осветитель; 4 – камера; 5 – исследуемый объект

Для пучков с малой длиной когерентности максимум интерферограммы наблюдается когда оптическая разность хода равна нулю. Пики более высоких порядков имеют меньшие амплитуды за счет нарушения когерентности пучков. Типичный вид интерферограммы представлен на рис. 2.



Рис. 2. Типичный вид интерферограммы

Как показано в [1], интенсивность интерференционной картины, если источник излучения имеет гауссов спектр, имеет вид:

$$I(x, y, z) = I_B(x, y)[1 + g(h(x, y) - z)\cos\{2k_c(h(x, y) - z) + \alpha(x, y)\}], (1)$$

где $I_b(x, y)$ – излучение фона; g(x, y) – амплитуда интерференционной картины; функция g(x, y) и параметр k_c – среднее волновое число излучения, зависят от источника излучения; $\alpha(x, y)$ – сдвиг фазы при отражении.

Как правило, функция g(x, y) имеет вид, близкий к функции Гаусса.

В дальнейшем зависимость от горизонтальных координат будем опускать. Тогда в дискретной форме выражение (1) примет вид:

$$I_i = I_B [1 + g(h - z_i) \cos\{2k_c(h - z_i) + \alpha\}]$$
 (2)

Методы анализа интерферограмм

Существует множество методов анализа интерферограмм, которые различаются по вычислительной сложности, точности и устойчивости к шумам.

Простейшими методами анализа интерферограмм являются метод центра масс и метод Фурье. Их подробное описание можно найти в [2].

Широкое применение получил класс методов, основанных на методах фазосдвигающей интерферометрии. Подобный метод впервые был предложен в [3]. Наиболее часто используется адаптированный пятиточечный алгоритм фазосдвигающей интерферометрии, который имеет следующий вид:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{[4(I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_5)^2]^{1/2}}{-I_1 + 2I_3 - I_5} ; \qquad (3)$$

$$M = \frac{(I_2 - I_4)^2 \{4(I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_5)^2 + (-I_1 + 2I_3 - I_5)^2\}^{1/2}}{4(I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_5)^2},$$
(4)

где φ и *М* – фаза и огибающая интерферограммы, соответственно.

Для данного метода существует множество алгоритмов компенсации ошибок [4, 5]. Однако даже в этом случае предъявляются жесткие требования к равномерности шага между кадрами.

Относительно недавно были разработаны так называемые вэйвлетметоды. Они основаны на применении вэйвлет-преобразования к интерферограммам. В предположении, что источник излучения имеет гауссов спектр, вэйвлет-преобразование имеет вид:

$$W_{I}(z') = \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-ik_{c}(z-z')] \exp\left[-\frac{(z-z')^{2}}{2w^{2}}\right] I(z)dz, \qquad (5)$$

где параметр *w* определяется длиной когерентности источника излучения.

Огибающая может быть получена как модуль *W*. Вэйвлет-метод обладает высокой точностью, устойчивостью к шумам интенсивности и возможностью работы при частоте дискретизации ниже частоты Найквиста. Подробное описание вэйвлет-методов изложено в [6, 7].

Развитие компьютерных технологий позволило использовать прямые методы регрессионного анализа. Примером может служить описанный в [8] метод прямой квадратичной регрессии. Суть данного метода заключается в интерполяции амплитуды интерферограммы квадратичным полиномом, и, после приведения к линейным переменным, последующей квадратичной регрессией полученного выражения. Данный метод сочетает высокую точность и устойчивость к шумам. Возможна компенсация нелинейности движения плеча интерферометра и учет изменения фазы света при отражении от исследуемого образца.

Так же следует отметить, что существует множество специальных методов, направленных на работу с конкретной установкой, либо для анализа определенного класса образцов.
Например, в случае, если установка поддерживает установку нескольких светофильтров, то возможно автоматическое распознавание и компенсация изменения фазы излучения при отражении от образца [9].

Другим примером могут служить методы, разработанные для анализа интерферограмм, полученных при исследовании объектов, покрытых тонкими пленками [10].

Результаты моделирования

Для сравнения рассмотренных выше алгоритмов нами был сгенерирован следующий набор интерферограмм (i = 0..100000, k = 0..200):

$$I_{i,k} = Int \left\{ 128 + \cos(100 + \varepsilon_1 - k) \exp\left[\frac{-(h_i - k)^2}{20^2}\right] + \varepsilon_2 \right\}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – случайные величины, имеющие гауссово распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_1, σ_2 . Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что погрешности рассмотренных методов в зависимости от шумовых параметров в исходных данных согласуются с теоретическими предсказаниями. Наибольшей точности позволили достичь вэйвлет-метод и метод прямой регрессии. Метод Фурье позволил достичь высокой точности, в случае отсутствия шумов частоты дискретизации.

Табл. 1. Величина среднеквадратичного отклонения восстановленного профиля от истинного положения

	Метод цен-	Метод	Метод фазо-	Вэйвлет	Метод
	тра масс	Фурье	сдвигающей	метод	прямой
			интерфером		регресии
$\sigma_1 = 0$	0,7	0,005	0,015	0,010	0,007
$\sigma_2 = 0$					
$\sigma_1 = 0,25$	1,1	1,6	0,3	0,03	0,05
$\sigma_2 = 0$					
$\sigma_1 = 0$	1,3	0,007	0,012	0,012	0,013
$\sigma_2 = 4$					
$\sigma_1 = 0,25$	1,5	2,1	0,4	0,04	0,06
$\sigma_2 = 4$					

Заключение

Рассмотрены методы анализа данных, получаемых при проведении измерений на сканирующем интерферометре белого света. Определены преимущества и недостатки каждого метода. Приведена сравнительная характеристика устойчивости к ошибкам. Построен модельный набор интерференционных картин. Проведено восстановление профиля поверхности по модельному набору интерференционных картин каждым из рассмотренных методов. Определено среднеквадратичное отклонение восстановленного профиля от реального положения для различных величин шумов в интенсивности интерферограмм и в положении по вертикальной оси для каждого из рассмотренных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wojciech Kaplonek and Czeslaw Lukianowicz (2012). Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements, Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy, Dr Ivan Padron (Ed.), ISBN: 978-953-51-0404-9.

2. Peter de Groot & Leslie Deck (1995): Surface Profiling by Analysis of Whitelight Interferograms in the Spatial Frequency Domain, Journal of Modern Optics, 42:2, P. 389–401.

3. **Harasaki, A.** Improved vertical-scanning interferometry / A. Harasaki, J. Schmit, J. Wyant // Applied optics. $-2000. - T. 39. - N_{\odot}. 13. - P. 2107-2115.$

4. Schmit, J. Some challenges in white light phase shifting interferometry / J. Schmit, A. Olszak // Interferometry XI: Techniques and Analysis. – 2002. – T. 4777. – P. 118–127.

5. New algorithm of white-light phase shifting interferometry pursing higher repeatability by using numerical phase error correction schemes of pre-processor, main processor, and post-processor / J. H. Kim [et al] // Optics and Lasers in Engineering. $-2008. - T. 46. - N_{\odot}. 2. - P. 140-148.$

6. Sandoz, P. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry / P. Sandoz // Optics letters. $-1997. - T. 22. - N_{\odot}. 14. - P. 1065-1067.$

7. **Recknagel, R. J.** Analysis of white light interferograms using wavelet methods / R. J. Recknagel, G. Notni // Optics Communications. $-1998. - T. 148. - N_{2}. 1. - P. 122-128.$

8. **Park, M. C.** Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms / M. C. Park, S. W. Kim // Optical Engineering. $-2000. - T. 39. - N_{\odot}. 4. - P. 952-959.$

9. Park, M. C. Compensation of phase change on reflection in white-light interferometry for step height measurement / M. C. Park, S. W. Kim // Optics letters. – $2001. - T. 26. - N_{\odot}. 7. - P. 420-422.$

10. Kim, S. W. Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry / S. W. Kim, G. H. Kim //Applied Optics. – 1999. – T. $38. - N_{\odot}$. 28. - P. 5968–5973.

УДК 620.179.14 ВИХРЕТОКОВЫЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ ТОЛЩИНОМЕР

А. В. ЧЕРНЫШЕВ, В. И. ШАРАНДО, И. Е. ЗАГОРСКИЙ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620.179.14 EDDY CURRENT MULTI-FREQUENCY THICKNESS METER A. V. CHERNYSHEV, V. I. SHARANDO, I. E. ZAGORSKY

Аннотация

В докладе сообщается о разработанном в ИПФ НАН Беларуси вихретоковом многочастотном толщиномере, у которого в процессе измерения толщины проводящего покрытия на проводящем основании частота тока возбуждения накладного преобразователя изменяется в некотором интервале. При определенных фиксированных значениях этой частоты производятся измерения фазы вносимой в преобразователь ЭДС и на основе анализа результатов измерений определяется толщина покрытия.

Ключевые слова:

вихретоковый толщиномер, многочастотный способ, вносимая ЭДС, фаза, накладной преобразователь.

Abstract

The report reports on the eddy current multi-frequency thickness meter developed at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, in which, during the measurement of the thickness of the conductive coating on a conductive substrate, the frequency of the excitation current of the transducer changes in a certain interval. For certain fixed values of this frequency, measurements are made of the phase of the emf introduced into the transducer and, based on the analysis of the measurement results, the thickness of the coating is determined.

Key words:

eddy current thickness meter, multi-frequency method, introduced emf, phase, superimposed transducer.

При необходимости защиты деталей, узлов от коррозии на их поверхность наносится защитное покрытие, например, из цинка, олова, меди, серебра или никеля. При этом толщина покрытия должна находится в определенном интервале допустимых значений, который определяется исходя из условий эксплуатации детали, узла. Контроль толщины покрытия в производственных условиях обычно производится с помощью толщиномеров. В ряде случаев оптимальным является применение вихретокового толщиномера.

В настоящее время известны различные вихретоковые толщиномеры, например, типа «Константа-К6», «ТЛ-1МП» [1], которые работают при

фиксированной частоте тока возбуждения накладного вихретокового преобразователя. Известен толщиномер типа «Константа-К6С» [2], в котором фактически содержится два накладных преобразователя, размещенных в одном корпусе. Один из них используется для определения электромагнитных параметров материала покрытия, который работает при относительно высокой частоте поступающего на него тока возбуждения. Второй накладной преобразователь работает при относительно низкой частоте его тока возбуждения. По фазе вносимой в него ЭДС определяется толщина покрытия. В результате достигается отстройка от влияния на результаты определения толщины покрытия вариаций электромагнитных параметров этого покрытия. Похожий двухчастотный способ контроля предложен в [3].

В ИПФ НАН Беларуси разработан многочастотный вихретоковый толщиномер, в котором для питания накладного преобразователя применяется ток возбуждения, частота которого в процессе измерения дискретно изменяется в определенном интервале. При каждой фиксированной частоте производятся измерения фазы (в качестве опорного сигнала фазометра используется напряжение, синфазное с током возбуждения преобразователя) вносимой в преобразователь ЭДС и на основе анализа полученных данных делается вывод о толщине покрытия. В результате удается повысить точность определения толщины покрытия при наличии вариаций электромагнитных параметров материалов как покрытия, так и основания.

Для примера в докладе приведены результаты расчетов зависимости фазы φ вносимой в накладной преобразователь ЭДС от толщины покрытия d, полученные при различных значениях удельной электропроводности покрытия σ_1 и при различных частотах f тока возбуждения, пропускаемого по катушке возбуждения преобразователя. Расчеты проведены по известным аналитическим выражениям, приведенным, например, в работе [4]. Преобразователь состоит из двух витков – создающего электромагнитное поле возбуждения и измерительного – расположенных над проводящим ферромагнитным полупространством, на поверхности которого имеется проводящее покрытие. Методика расчета подобна примененной в работе [5].

Сначала приняты следующие электромагнитные параметры материалов покрытия и подложки. Для материала покрытия удельная электропроводность $\sigma_1 = 5,291$ МСм/м (что примерно соответствует удельной электропроводности хрома, обозначим данное численное значение как σ_{10}). Удельная электропроводность основания $\sigma_2 = 11,5$ МСм/м, его относительная магнитная проницаемость $\mu_2 = 100$. Это примерно соответствует электропроводности и относительной магнитной проницаемости никеля. Амплитудное значение тока возбуждения принято равным 1А, радиусы *R* обоих витков одинаковы и равны 0,002 м, расстояние *h* от витка, создаю-

щего поле возбуждения, до поверхности полупространства составляет 0,001 м, измерительный виток расположен на середине этого расстояния.

Результаты расчетов, полученные при f = 300 кГц, представлены на рис. 1 линией 1. При такой частоте глубина проникновения δ_S плоской электромагнитной волны в материал покрытия составляет 400 мкм. При этом по вертикальной координатной оси отложены не значения φ , а абсолютная величина разности $\varphi = \varphi_{Cu}$, где $\varphi_{Cu} - \varphi_{a3a}$ вносимой в измерительный виток эдс при расположении преобразователя над медным полупространством (электропроводность меди принята равной 58,1 МСм/м). Абсолютное значение разности $\varphi - \varphi_{Cu}$ обозначено как $\Delta \varphi$. Цифрой 2 на рис. 1 обозначена зависимость $\Delta \varphi$ от *d*, полученная при значении σ_1 , превышающем величину σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 –при σ_1 меньшей σ_{10} на 20 %.

Рассмотрим, как вариации величины σ_1 сказываются на погрешности определения толщины покрытия *d*, определяемой по значениям $\Delta \varphi$.





Предположим, что зависимость $\Delta \varphi$ от *d*, представленная линией 1 на рис. 1, используется в вихретоковом толщиномере в качестве калибровочной, т. е. на основе измерения значения $\Delta \varphi$ определяется толщина покрытия *d*. Основываясь на данных, приведенных на рис. 1, определим, к какой относительной погрешности δ_d определения *d* при помощи этого толщиномера приведут вариации величины σ_1 на ±20 % относительно значения σ_{10} . Анализ расчетных данных показывает, что в области толщин порядка 50 мкм максимальная относительная погрешность δ_d определения толщины покрытия составляет 31,7 %, в области толщин порядка 450 мкм значение δ_d равно 33 %.

Из приведенных данных следует, что для уменьшения относительной погрешности δ_d определения толщины покрытия, вызванной вариациями величины σ_1 , необходимо определять значение σ_1 при относительно высокой частоте f, при которой на результаты измерения не оказывают влияния электромагнитные параметры материала основания (из-за относительно малой глубины проникновения поля возбуждения). Затем определенное значение σ_1 необходимо учитывать при анализе результатов измерения фазы φ вносимой эдс преобразователя (с целью определения по значению φ толщины покрытия d) при более низкой рабочей частоте f толщиномера. Рассмотрим возможность определения величины σ_1 на основе измерений $\Delta \varphi$ при относительной высокой частоте f.

На рис. 2 приведены результаты расчета зависимостей $\Delta \varphi$ от *d*, полученные при f = 5,8 МГц и прежних параметрах преобразователя и двухслойного образца. Как и на рис. 1, цифрой 2 на рис. 2 обозначена зависимость, полученная при значении σ_1 , превышающем σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 – зависимость, полученная при величине σ_1 , меньшей σ_{10} на 20 %, цифрой 1 обозначена зависимость, полученная при $\sigma_1 = \sigma_{10}$.



Рис. 2. Зависимость $\Delta \varphi$ от d при f =5,8 МГц: 1 – σ_1 = 5,291 МСм/м; 2 – σ_1 = 6,3492 МСм/м; 3 – σ_1 = 4,2328 МСм/м

Из рис. 2 следует, что при данной относительно высокой частоте f отсутствует зависимость $\Delta \varphi$ от толщины d покрытия, когда она превышает 200 мкм. Это объясняется поверхностным эффектом, в результате которого ограничена глубина проникновения переменного электромагнитного поля возбуждения в проводящий материал. (При f = 5,8 МГц для рассматриваемого материала с $\sigma_{10} = 5,291$ МСм/м значение $\delta_s = 91$ мкм.) При d > 200 мкм, как следует из рис. 2, увеличение σ_1 относительно значения σ_{10} на 20% приводит к уменьшению $\Delta \phi$ на 12% относительно того значения, которое имеет место при $\sigma_1 = \sigma_{10}$. Уменьшение же σ_1 относительно σ_{10} на 20% приводит соответственно к увеличению $\Delta \phi$ на 18%. Из приведенных данных следует, что при относительно высокой частоте f поля возбуждения по измерениям величины ϕ можно определять значение удельной электропроводности материала покрытия σ_1 .

Как видно из рис. 2, при $d \ge 200$ мкм увеличение σ_1 на 20 % относительно σ_{10} приводит к изменению $\Delta \phi$ (и, соответственно, ϕ) на 0,35°. Это показывает, что для точного определения величины σ_1 необходимо обеспечить высокую точность измерения ϕ . Для толщиномера разработан фазометр, определяющий величину ϕ с абсолютной погрешностью \pm 0,05° в диапазоне частот от 1 до 10 МГц.

Разработанный многочастотный вихретоковый толщиномер позволяет повысить точность определения толщины покрытия при неоднородном распределении электромагнитных параметров покрытия по его толщине. Кроме этого, достигается в большей степени, чем при двухчастотном способе вихретоковой толщинометрии, отстройка от влияния вариаций электромагнитных параметров основания на результаты определения толщины покрытия.

В качестве примера на рис. 3 приведены расчетные зависимости фазы вносимой в преобразователь ЭДС от частоты тока возбуждения преобразователя при различных толщинах *d* покрытия. Расчет проведен при $\sigma_1 = 5,24$ МСм/м, удельная электропроводность основания σ_2 принята равной 14,6 МСм/м, его относительная магнитная проницаемость $\mu_2 = 300$. Из рис. 3 следует, что при f = 8 МГц значения ϕ одинаковы для всех трех образцов (т. е. при такой частоте основной вклад в формирование о вносит только материал покрытия образцов). Затем, по мере уменьшения f, примерно при f = 6 МГц, у образца с толщиной покрытия d = 100 мкм на формирование ф начинает оказывать влияние и материал основания этого образца. При f примерно равной 3,5 МГц уже и у образца с толщиной покрытия 200 мкм на формирование о начинает оказывать влияние и материал его основания. При изменении σ1 соответственно изменяется характер зависимостей ϕ от *f*. Например, при увеличении σ_1 до 5,7 МСм/м фаза ϕ при f=10 МГц возрастает, по абсолютному значению (относительно первоначального случая, когда σ_1 равнялась 5,24 МСм/м) на 0,1°. Это еще раз показывает, что требования к точности фазометра высоки.



ф, град.

Рис. 3. Зависимость ϕ от f при: 1 - d = 1 м; 2 - d = 200 мкм; 3 - d = 100 мкм

Практически многочастотный способ контроля реализуется следующим образом. При относительно высокой частоте f (при которой материал основания не вносит вклад в формирование φ) определяется величина φ , зависящая от электромагнитных параметров только покрытия. После этого, при известных параметрах накладного преобразователя, рассчитывается значение σ_1 (например, на основе работ [4, 6]). После этого, также на основе расчетов, теперь уже для известного значения σ_1 и при известных электромагнитных параметрах основания, находится зависимость φ от fпри различных толщинах покрытия d. На основе сравнения полученной экспериментально зависимости φ от f с расчетными определяется толщина покрытия d.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунов, А. С. Толщиномер гальванических покрытий ТЛ-1МП / А. С. Бакунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 6. – С. 80–84.

2. Сясько, В. А. Измерение толщины напыляемых никелевых покрытий на крупногабаритных чугунных изделиях / В. А. Сясько // Записки Горного ин-та. – 2016. – Т. 221. – С. 712–716.

3. Пат. МПК7 G01B 7/06. Вихретоковый способ двухчастотного контроля изделий / Н. Г. Богданов, В. А. Приходько, А. И. Суздальцев; заявитель Орловский государственный техн. ун-т. – № 2184931 ; заявл. 03.02.00 ; опубл. 10.07.02, Бюл. изобр. № 19.

4. Соболев, В. С. Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.

5. **Чернышев, А. В.** Выбор рабочей частоты вихретокового толщиномера с накладным преобразователем / А. В. Чернышев // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1 (8). – С. 73–77.

6. Li, Y. Magnetic Field-Based Eddy-Current Modeling for Multilayered Specimens / Y. Li, T. Theodoulidis, G. YunTian // IEEETrans. Magn. – 2007. –V. 43. – P. 4010–4015.

E-mail: lab5@iaph.bas-net.by

УДК 620.179.142.6 РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ СЕРИЙНЫМИ ПРИБОРАМИ ТИПА МТЦ

В. И. ШАРАНДО, А. В. ЧЕРНЫШЕВ, О. В. БУЛАТОВ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 620.179.142.6 DEMAGNETIZING DEVICE FOR INCREASING PRECISION MEASUREMENT OF THICKNESS OF NICKEL COATINGS BY MEANS OF SERIAL GAUGES MTG V. I. SHARANDO, A. V. CHERNYSHEV, O. V. BULATOV

Аннотация

Обоснована возможность применения серийных приборов МТЦ-2М-2 и МТЦ-3-5 для измерения толщины никелевых покрытий на неферромагнитных основаниях в диапазоне (0 – 300) мкм, в три раза превышающем паспортный диапазон этих приборов. Установлено, что пятна остаточной намагниченности на поверхности таких покрытий могут приводить при измерении их толщины к дополнительной погрешности, достигающей 50 %. Предложено механическое размагничивающее устройство, позволяющее устранять эти пятна; основными его достоинствами являются простота конструкции, портативность и отсутствие необходимости в источнике питания. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность этого устройства.

Ключевые слова:

никелевые покрытия, толщина покрытий, магнитные толщиномеры, диапазон измерений, остаточная намагниченность, размагничивающее устройство, точность измерений.

Abstract

The possibility of applying of the serial gauges MTG-2M-2 and MTG-3-5 for measuring thickness of nickel coatings on non-ferromagnetic bases in the range (0–300) mkm that is three times the passport range of these gauges has been established. It is found that spot residual magnetization on surface of such coatings during measuring their thickness can lead to additional error that reaches 50 %. Mechanical device for eliminating this magnetization is proposed; the basic advantages of the devise are simplicity of design, portability and no need for a power source. Experimental data confirming the effectiveness of this device have been presented.

Key words:

nickel coatings, thickness of coatings, magnetic thickness gauges, measuring range, residual magnetization, demagnetizing device, measurement accuracy.

Современные толщиномеры типа МТЦ [1, 2], серийно выпускаемые ИПФ НАН Беларуси, предназначены в основном для измерения толщины

неферромагнитных покрытий, нанесенных на ферромагнитные (стальные) основания. Эти приборы базируются на магнитодинамическом методе, главное достоинство которого состоит в изначальном отсутствии в информативном сигнале преобразователя составляющей, обусловленной создаваемым им намагничивающим полем и снижающей чувствительность к измеряемой толщине покрытий [1]. В итоге магнитодинамический прибор по сравнению с другими магнитными обеспечивает толщинометрию в наиболее широком диапазоне. Серийные приборы типа МТЦ имеют небольшие габаритные размеры (электронный блок – 150 х 80 х 30 мм, преобразователь – Ø19х55 мм) и питаются автономно от батареек AAA или аналогичных аккумуляторов [2]. Приборы МТЦ-2М и МТЦ-3 сертифицированы в Республике Беларусь: первые имеют сертификат об утверждении типа средств измерений № 6931 и декларацию об их соответствии требованиям технических регламентов Таможенного союза № ТС ВУ/112 11.01. ТР020 003 16641, вторые – сертификат № 6932 и декларацию № ТС ВУ/112 11.01. ТР020 003 16640. К настоящему времени на отечественных предприятиях внедрено более тысячи таких приборов.

Приборы типа МТЦ позволяют также измерять толщину гальванических никелевых покрытий, нанесенных на неферромагнитные или ферромагнитные основания, в диапазоне (0–100) мкм. Его ширина достаточна для большинства промышленных изделий, однако когда данная толщина выходит за этот диапазон, достигая в отдельных случаях 300 мкм, использование указанных приборов не регламентировано их технической документацией. Для таких случаев используют, например, токовихревые приборы ВТН-600 украинской фирмы «Кром» [3] или «Константа-К6Ц» российской фирмы «Константа» [4]. В настоящей работе приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности измерения приборами типа МТЦ толщины никелевых покрытий в диапазоне (0–300) мкм на неферромагнитных основаниях.

Существует и другая проблема магнитной толщинометрии никелевых покрытий, обусловленная наличием пятен остаточной намагниченности на их поверхности. Такие пятна появляются при измерении толщины покрытий магнитными приборами, а также могут возникать в процессе изготовления изделий. По результатам экспериментальных исследований, проведенных с помощью измерителя магнитных полей ИМП-1 [2], установлено, что остаточная магнитная индукция над поверхностью никелевых покрытий может достигать 5 мТл. Так как приборы МТЦ-2М-2, МТЦ-2М-3, МТЦ-3-4 и МТЦ-3-5 имеют преобразователи, создающие намагничивающие поля относительно малой интенсивности, столь высокая остаточная индукция может привести к недопустимо большой погрешности измерения толщины покрытий. Решать эту проблему следует путем размагничивания участков покрытия, имеющих пятна остаточной намагниченности, до измерения его толщины. Ниже рассмотрена конструкция механического

устройства, устраняющего такие пятна и за счет этого позволяющего измерять толщину никелевых покрытий с требуемой на практике точностью.

Функциональные возможности приборов МТЦ-2М-2 и МТЦ-3-5, предназначенных для измерения толщины никелевых покрытий на неферромагнитных основаниях, были исследованы на примере первого из них. Исследование проведено с использованием пяти мер никелевых покрытий, нанесенных гальваническим методом на неферромагнитные (бронзовые) основания; толщина наиболее толстого покрытия составляла ~655 мкм. Для устранения возможных пятен остаточной намагниченности каждая мера была предварительно размагничена в электромагнитном поле соленоида, подключенного к сети переменного тока. Так как исходную градуировку прибора МТЦ-2М-2 выполняют в диапазоне (0–100) мкм, указанном в его паспорте, толщина покрытий всех мер измерена в градуировочном режиме и показания прибора отображались на его индикаторе в безразмерных единицах. Средние арифметические значения показаний, полученных при измерении этой толщины, представлены в виде точек на рис. 1. По этим значениям методом наименьших квадратов найдено уравнение зависимости информативного сигнала F преобразователя от толщины b покрытий. По данному уравнению построена приведенная здесь же кривая функции F = f(b).



Рис. 1. Зависимость информативного сигнала F магнитодинамического преобразователя прибора МТЦ-2М-2 от толщины b никелевых покрытий, нанесенных на бронзовые основания (вертикальная штриховая прямая – верхний предел паспортного диапазона значений толщины b, в котором градуируют приборы МТЦ-2М-2 и МТЦ-3-5)

Характер кривой, изображенной на рис. 1, свидетельствует о том, что фактический диапазон измеряемой приборами МТЦ-2М-2 и МТЦ-3-5 толщины никелевых покрытий, расположенных на неферромагнитных основаниях, не менее чем в три раза шире паспортного диапазона обоих приборов. Следовательно, каждый прибор можно проградуировать на мерах, охватывающих диапазон (0–300) мкм, а затем использовать для измерения указанной толщины в этом диапазоне. Наличие пятен остаточной намагниченности на поверхности никелевых покрытий может привести к тому, что погрешность измерения их толщины превысит допускаемую на практике. В настоящей работе это показано путем намагничивания размагниченных в соленоиде покрытий перед измерением их толщины. Оно выполнено прикладыванием к поверхности каждого покрытия плоского торца постоянного цилиндрического магнита, изготовленного из неодим-железо-бора.

На рис. 2 сплошные кривые построены по изображенным точками среднеарифметическим значениям показаний прибора МТЦ-2М-2, полученным в ходе многократных измерений толщины покрытия каждой из пяти указанных выше мер, проведенных при различных направлениях намагничивающего поля.

Кривая *1* построена по показаниям, полученным в случае, когда вектор намагниченности приставного магнита был противоположен вектору намагниченности постоянного магнита, установленного в преобразователе прибора. Кривая *2* соответствует случаю, когда векторы намагниченности приставного магнита и магнита преобразователя были направлены одинаково. В виде штриховой кривой представлена зависимость, показанная на предыдущем рисунке. Диаметр приставного магнита выбран достаточно большим (10 мм) для того, чтобы после намагничивания любого никелевого покрытия на его поверхности осталось магнита примерно втрое больше диаметра магнита преобразователя, остаточная намагниченность очень сильно изменила показания прибора МТЦ-2М-2.



Рис. 2. Влияние на функцию F = f(b) магнитного состояния материала никелевых покрытий, нанесенных на бронзовые основания: l – при противоположном направлении векторов намагниченности приставного магнита и магнита, установленного в преобразователе; 2 – при одинаковом направлении этих векторов

Рис. 2 позволяет визуально оценить уровень дополнительной погрешности измерения толщины никелевых покрытий, обусловленной практически максимальной намагниченностью их материала. Видно, что в случае противоположной ориентации векторов намагниченности приставного магнита и магнита преобразователя данная погрешность несколько больше, чем в случае их одинаковой ориентации. В целом из рисунка следует, что по модулю эта погрешность может достигать нескольких десятков процентов, значительно превосходя допускаемую на практике погрешность, в большинстве случаев не превышающую 10 %.

Решение проблемы, обусловленной пятнами остаточной намагниченности, состоит в их устранении путем предварительного размагничивания материала покрытий. Такое размагничивание предложено реализовывать с помощью механического устройства, конструкция которого показана на рис. 3, а. Оно состоит из трех элементов: корпуса с внутренним резьбовым отверстием, размещенного в нем винта и жестко закрепленного на его нижнем торце постоянного цилиндрического магнита. Его ось и вектор намагниченности перпендикулярны осям корпуса и винта, материалы которых должны быть неферромагнитными (дюраль, латунь, эбонит и т. п.). Габаритные размеры предложенного устройства невелики: из рис. 3, б видно, что оно сопоставимо с батарейкой АА.





б)



Рис. 3. Механическое устройство, обеспечивающее полное размагничивание материала никелевых покрытий: *а* – конструкция устройства; *б* – его внешний вид

Работает предложенное устройство следующим образом:

1) устанавливают его на поверхность покрытия;

2) вворачивают винт в корпус до упора магнита в эту поверхность;

3) выворачивают винт до удаления от нее магнита на расстояние, на котором поле магнита уже практически не изменяет магнитное состояние материала покрытия.

Вращение и одновременное вертикальное перемещение магнита действуют аналогично низкочастотному магнитному полю, амплитуда колебаний которого сначала возрастает до максимума, а затем убывает до нуля. Результат применения размагничивающего устройства практически эквивалентен внесению изделия с намагниченным покрытием в соленоид, генерирующий переменное поле, и последующему удалению из него.

Эффективность предложенного устройства подтверждают табличные данные (табл. 1). Перед их получением прибор МТЦ-2М-2 был проградуирован на четырех мерах (не использована мера с наиболее толстым покрытием) после полного их размагничивания полем соленоида. Показания прибора, полученные при толщинометрии размагниченных соленоидом мер, оказались практически равными значениям толщины их покрытий, приведенным в столбце 1 табл. 1. Значения *T*_{ср} в столбцах 2 и 4 вычислены по показаниям, полученным после намагничивания материала покрытий этих мер приставным магнитом, обеспечивающим остаточную индукцию около 5 мТл; при этом направления векторов намагниченности приставного магнита и магнита преобразователя прибора МТЦ-2М-2 в первом случае были одинаковыми, а во втором – противоположными. Отсутствие двух значений в столбце 2 обусловлено тем, что на соответствующих мерах информативный сигнал преобразователя превысил верхний предел градуировочного диапазона. В столбцах 3 и 5 приведены соответствующие обоим случаям значения б дополнительной погрешности, обусловленной наличием пятен остаточной намагниченности. Столбцы 6 и 7 содержат данные, полученные после размагничивания материала покрытий с помощью предложенного устройства.

Покрытия	Покрытия намагничены		Покрытия намагни-		Покрытия	
размагничены	в направлении поля		чены противопо-		размагничены	
соленоидом	преобразователя		ложно полю		устройством	
			преобраз	ователя		
$T_{\rm cp}$, мкм	$T_{\rm cp}$, мкм	δ, %	$T_{\rm cp}$, мкм	δ, %	$T_{\rm cp}$, мкм	δ, %
1	2	3	4	5	6	7
91,3	111,9	22,6	73,5	-19,5	91,7	0,4
195,7	236,5	20,8	133,1	-32,0	199,6	2,0
289,5	превышение	_	164,2	-43,3	293,3	1,3
426,2	диапазона	_	205,4	-51,8	411,4	-3,5
	градуировки					

Табл. 1. Результаты измерений прибором МТЦ-2М-2 толщины намагниченных и размагниченных никелевых покрытий

Пятна остаточной намагниченности могут увеличить погрешность измерения толщины никелевых покрытий на недопустимые для практики 20–50 %. Для ее снижения до приемлемого уровня вместо соленоида можно использовать предложенное устройство, не уступающее ему по эффективности. Достоинствами этого устройства являются простота конструкции, портативность и малая масса, отсутствие необходимости в каком-либо источнике питания.

Таким образом, использование серийных приборов типа МТЦ в сочетании с предложенным устройством позволяет измерять толщину никеле-

вых покрытий на неферромагнитных основаниях в диапазоне (0–300) мкм с приемлемой для практики точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лухвич, А. А.** Магнитные толщиномеры нового поколения / А. А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 3–15.

2. Приборы неразрушающего контроля [Электронный ресурс] / Гос. науч. учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси». – Режим доступа: http://iaph.bas-net.by/VDev/index.html. – Дата доступа: 30.05.17.

3. Вихретоковый толщиномер никелевых покрытий ВТН-600 [Электронный ресурс] / Производственная коммерческая фирма «Кром». – Режим доступа: http://test.krom.ua/ru/produc-tion/ourwarehouse/2. – Дата доступа: 31.05.17.

4. Прибор измерения геометрических параметров многофункциональный «Константа К6Ц: руководство по эксплуатации УАЛТ.192.000.00РЭ [Электронный ресурс] / ЗАО «Константа». – Режим доступа: http://constanta.ru/bitrix/templates/constanta_index/images/Паспорта/Паспорт%20К6 цТFT.pdf. – Дата доступа: 31.05.17.

E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

УДК 620.179 ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ С ЦИФРОВЫМИ ДАТЧИКАМИ ВЛАЖНОСТИ

С. В. БОЛОТОВ, Н. В. ГЕРАСИМЕНКО, В. Н. ПОЧУЙКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 620.179

TEST OF THE POLYURETHANE-INSULATED PIPELINE MONITORING SYSTEM WITH DIGITAL HUMIDITY SENSORS S. V. BOLOTOV, N. V. HERASIMENKO, V. N. POCHUYKO

Аннотация

Применение цифровых датчиков влажности позволяет усовершенствовать возможности существующей системы контроля трубопроводов с теплоизоляцией из пенополиуретана, основанной на измерении электрического сопротивления между специальным медным проводом и металлической трубой. На основе экспериментальных и теоретических исследований были разработаны и протестированы программно-аппаратные средства контроля состояния пенополиуретановой изоляции.

Ключевые слова:

пенополиуретан, трубопровод, контроль, влажность.

Abstract

Current polyurethane-insulated pipeline monitoring system, based on the measurement of the electrical resistance between the metal pipe and the copper wire, can be replaced by the new system that uses digital humidity sensors. Basing the research on that assumption, the technique and the hardware-software facilities of the humidity level monitoring system implementation were developed and tested.

Key words:

polyurethane, monitoring, humidity, control, measurement.

Система оперативного дистанционного контроля (СОДК) состояния пенополиуретановой (ППУ) изоляции трубопроводов тепловых сетей с цифровыми датчиками влажности была предложена в качестве альтернативы существующей СОДК, основанной на измерении электрического сопротивления изоляционного слоя и применении рефлектометров для локации мест повреждения [1, 2].

Задача СОДК с цифровыми датчиками влажности – повысить точность и достоверность обнаружения участков теплоизоляции с повышенной влажностью в теплосетях, состоящих из труб, предизолированных пенополиуретаном. Кроме этого, применение цифровых компонентов в СОДК дает следующие преимущества:

- регистрация факта и степени увлажнения теплоизоляционного слоя;

– возможность привязки цифрового кода каждого датчика к схеме трубопровода, что позволит с точностью установки датчиков обнаружить место повреждения без использования дополнительного локатора;

– контроль температуры позволяет осуществлять температурную коррекцию показаний влажности;

 высокая помехоустойчивость, удобство представления информации, возможность ее хранения.

В процессе разработки СОДК с цифровыми датчиками влажности одним из важных вопросов является выбор электронных компонентов, способных работать в условиях повышенных температур, возникающих в процессе химической реакции компонентов ППУ и в процессе эксплуатации теплосети.

В результате теоретических и экспериментальных исследований [3], были подобраны цифровые чувствительные элементы, удовлетворяющие указанным условиям эксплуатации. Типы применяемых чувствительных элементов представлены в табл. 1.

Тип	Производитель	Внешний вид	Габариты, мм	Точность измерения влажности\ температуры	Рабочая температура, °С
HTU21	Measurement Specialties (Франция)	A	3x3x0,9	±3 % / 0,3 °C	-40-+125
SHT21	Sensirion (Швейцария)	1	3x3x1,1	±2 % / 0,3 °C	-40-+125

Табл. 1. Характеристики чувствительных элементов датчика влажности

Разработанный датчик представляет собой устройство, смонтированное на одной печатной плате в защитном корпусе, датчик располагается непосредственно в слое ППУ изоляции труб, фасонных изделий на этапе производства и монтажа стыков. Структурная схема и внешний вид цифрового датчика влажности (ЦДВ) и температуры представлена на рис. 1, а и б соответственно [2].



Рис. 1. Цифровой датчик влажности и температуры: ДВТ – датчик влажности и температуры (чувствительный элемент); К – контроллер; ПСК – проводники системы контроля

Для оценки эффективности функционирования СОДК при наличии увлажнения, вызванного утечкой теплоносителя, проведены экспериментальные исследования. В предварительно изготовленный участок трубы диаметром 159 мм и длиной 1 м с искусственно созданным дефектом установлена система (рис. 2), состоящая из трех датчиков, расположенных на расстоянии 300 мм друг от друга и на расстоянии 20 мм от поверхности металлической трубы, что соответствует стандартному расположению проводников традиционной СОДК.



Рис. 2. Экспериментальный образец с системой контроля

При этом датчик №2 расположен непосредственно над дефектом, датчик №1 расположен на стороне подачи теплоносителя, а датчик №3 на выходе (рис. 3). При помощи блока сопряжения (БС) система подключена к компьютеру (ПК) с программным обеспечением для сбора и обработки измерительной информации.



Рис. 3. Расположение датчиков в трубе

Испытания проводились в два этапа. Первый этап заключался в исследовании температуры реакции компонентов ППУ в процессе заливки экспериментального образца. Второй этап заключался в исследовании реакции системы на наличие утечки теплоносителя.

На рис. 4 представлены результаты исследования температуры реакции компонентов ППУ для трёх датчиков. Интервал опроса системы составлял 1 с.



Рис. 4. Мониторинг температуры реакции компонентов ППУ: 1 – датчик № 1; 2 – датчик № 2; 3 – датчик № 3

Анализ графиков показывает, что датчики находятся в разных температурных условиях. Максимальную температуру 82 °С регистрирует датчик № 3, расположенный в месте заливки компонентов ППУ. Из графиков видно, что встроенный датчик температуры позволяет установить время начала и окончания реакции компонентов ППУ, проводить мониторинг температуры в процессе затвердевания. Поскольку процесс реакции и затвердевания является ключевым этапом изготовления труб с ППУ изоляцией, возможность контроля температуры в процессе реакции компонентов позволит оценивать свойства пенополиуретановой изоляции. При этом дополнительное оборудование или установка датчиков температуры не требуется.

Условия проведения испытания реакции системы на наличие утечки теплоносителя представлены в табл. 2.

Табл. 2. Условия про	ведения испытания
----------------------	-------------------

Температура теплоносителя, °С	75
Давление теплоносителя, МПа	1,8
Диаметр искусственного дефекта, мм	5
Интервал опроса системы, с	30

Испытания проводились в течение суток. На рис. 5 представлен график изменения влажности, регистрируемой датчиками.



Рис. 5. График изменения влажности, регистрируемой датчиками

Из графика видно, что реакция датчика №2, расположенного непосредственно над дефектом наблюдается менее чем через 1 ч и далее значение регистрируемой влажности увеличивается. При этом скорость изменения влажности на начальном этапе составляет 12 % в час, между 5 и 10 часами – 2% в час и далее – 0,8 % час. Датчики №1 и №3, расположенные на расстоянии 300 мм от дефекта также регистрируют изменение влажности через 3 часа после начала испытаний. Причём скорость изменения влажности гораздо ниже – 0,2 % час.

Наличие датчика температуры позволяет производить температурную корректировку показаний, отслеживать изменение температуры теплоносителя, а также оценивать характер повреждения: защитная оболочка (проникновение грунтовых вод, температура при намокании уменьшается) или металлическая труба (теплоноситель, температура при намокании увеличивается). На рис. 6 представлен график изменения температуры, регистрируемой датчиками. При этом в интервале времени между 16.00 и 7.00 часами температура теплоносителя была снижена с 75 до 60 °C, что четко отслеживается показаниями датчиков.



Рис. 6. График изменения температуры, регистрируемой датчиками

Планируется проведение дальнейших экспериментальных исследований функционирования СОДК состояния ППУ изоляции при различных условиях эксплуатации: плотности изоляции (определяется составом компонентов ППУ, условиями заливки, размерами образца), температуры теплоносителя и рабочего давления, размеров дефекта стальной трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотов, С. В. О возможности использования датчиков влажности для контроля состояния трубопроводов тепловых сетей / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, М. Акпануром // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 281.

2. Болотов, С. В. Система оперативного дистанционного контроля состояния пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей с цифровыми датчиками влажности / С.В. Болотов, Н.В. Герасименко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2(51) – С. 139–147.

3. Болотов, С. В. Контроль температуры полимерного покрытия при производстве ПИ-труб / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко // Приборы и методы неразрушающего контроля композиционных материалов : сб. тр. 1-й дистанционной науч.-техн. конф. НККМ-2014. – СПб, 2015. – С. 172–176.

E-mail: <u>s.v.bolotov@mail.ru</u> <u>gerasimenko_nikita@hotmail.com</u>

УДК 004.6+534-16

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЛИТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

П. Ю. БРАНЦЕВИЧ, Е. Н. БАЗЫЛЕВ, С. Ф. КОСТЮК

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Минск, Беларусь

ASSESSMENT OF MECHANISM TECHNICAL CONDITION BASED ON THE ANALYSIS OF LONG VIBRATION SIGNALS P. J. BRANCEVICH, Y. N. BAZYLEU, S. F. KASTSIUK

Аннотация

В результате сбора в течение длительного периода времени данных от вибродатчиков, установленных на множестве однотипных устройств, получается большой объем данных для анализа. Тщательно проведенная обработка этих данных создает предпосылки для выявления технических проблем на ранней стадии и принятия оперативных мер по их устранению. Рассмотрены примеры обработки данных систем вибромониторинга.

Ключевые слова:

вибрация, мониторинг, состояние, обработка, сигнал.

Abstract

As a result of collecting over a long period of time data from vibration sensors, installed on a plurality of similar devices, It obtained a large amount of data for analysis. Carefully conducted by processing these data, a prerequisite for the identification of technical problems at an early stage and operational measures to address them. Examples of data processing systems, vibration monitoring.

Key words:

vibration, monitoring, condition, processing, signal.

Введение

При решении задач оценки технического состояния механизмов и агрегатов с вращательным движением, параметры вибрации являются одними из важнейших. Причем, при длительном безостановочном функционировании технического объекта требуется непрерывное наблюдение или слежение за изменением его вибрационных параметров [1].

Стандартами определены правила проведения непрерывного контроля и мониторинга вибрационного состояния сложных и дорогостоящих агрегатов (электрические турбогенераторы, газоперекачивающие установки, компрессоры и т. п.) в ходе их эксплуатации [2–3]. Для решения этих задач применяют многоканальные системы и комплексы, которые определяют, отображают и регистрируют на каком-то носителе информации значения параметров вибрации через небольшие (не более нескольких секунд) промежутки времени, а также выполняют допусковый контроль, функции сигнализации и, в определенных применениях, защитного отключения [1, 4].

Системы вибрационного контроля и защиты, построенные на базе компьютерной техники, позволяют реализовать разнообразные, как стандартные так и сложные алгоритмы защиты, ориентированные на конкретные типы дефектов и ситуаций. Это, в свою очередь, позволяет избежать необоснованных («ложная тревога») срабатываний защитного отключения и не допустить «пропуска дефекта».

Реализован и прошел апробацию на ряде турбоагрегатов алгоритм защитного отключения по вибрации, в котором учитывается несколько факторов:

- низкочастотная составляющая вибрации;

- оборотные составляющие вибрации;

- высокочастотная составляющая вибрации.

Сигнал на защитное отключение контролируемого механизма вырабатывается в том случае, если он выработан по одному из указанных критериев, или по нескольким критериям одновременно [5].

В результате функционирования компьютерных комплексов вибрационного контроля и мониторинга накапливаются большие объемы данных, содержащих информацию об изменении во времени различных вибрационных параметров для всех точек контроля [6, 7]. Они позволяют выявить изменение технического состояния контролируемого объекта или провести анализ причин, приведших к неисправности или отказу оборудования. Но более полную информацию об эксплуатируемых механизмах содержат непрерывные вибрационные сигналы, регистрируемые на протяжении длительных временных интервалах и в разных режимах работы.

Анализ длинных реализаций вибрационных сигналов

Решение задачи проактивного технического обслуживания производственного оборудования с быстрым реагированием требует непрерывного слежения за вибрацией его узлов и обнаружения самых незначительных изменений в вибрационных сигналах, которые могут быть индикатором начальной стадии износа и дефектов.

Регистрацию таких вибрационных сигналов можно осуществить используя измерительно-вычислительный комплекс «Тембр-М» на базе мобильного компьютера, модуля АЦП с USB интерфейсом, виброизмерительных каналов с первичными пьезоэлектрическими преобразователями и проблемно-ориентированного программного обеспечения [8, 9]. Также ввод и сохранение длительных вибрационных сигналов производится с помощью специальных сборщиков-регистраторов [10]. На рис. 1 показан пример такого сигнала.



Рис. 1. Исходный вибрационный сигнал в единицах виброускорения

Затем выполняется цифровая обработка зарегистрированного сигнала. Её целью может быть выявление каких-то аномальных всплесков или явлений [7], или вычисление определенных параметров вибросигнала через заданные временные интервалы (построение их трендов во времени). Такими параметрами, например, могут быть: амплитуды спектральных составляющих вибросигнала на фиксированных частотах (например, $f_1=25 \ {\Gamma}$ ц, $f_2=50 \ {\Gamma}$ ц, ..., $f_{\kappa}=2000 \ {\Gamma}$ ц); мощность или среднее квадратическое значение (СКЗ) вибрации в полосе частот $f_{\mu} \div f_{\kappa}$ (может задаваться несколько полос); пик-фактор; эксцесс; асимптота; коэффициент модуляции огибающей вибросигнала; СКЗ составляющих вибрации, выделяемых вейвлетами с определенными центральными частотами своих АЧХ. При наличии высокопроизводительных вычислителей обработка вибросигнала может быть произведена параллельно с его регистрацией.

На рис. 2 в качестве примера представлен часовой тренд ряда параметров, вычисленных при обработке вибрационного сигнала, полученного при контроле вибрации подшипниковой опоры турбоагрегата.



Рис. 2. Изменение СКЗ виброскорости в частотной полосе 10–1000 Гц и СКЗ частотных составляющих 50, 100, 150, 200, 25 Гц

Визуальный анализ трендов параметров вибрации позволяет обнаружить их возможные изменения и, соответственно, изменение технического состояния контролируемого объекта.

Однако его проведение связано со значительными временными затратами технического специалиста, к тому же, желательно получить какие-то численные оценки обрабатываемых данных. Поэтому актуальна автоматизация этой процедуры.

Статистическая обработка данных может быть выполнена с помощью достаточно простого программного средства. На рис. 3 показан пример такой обработки, в результате которой получена гистограмма распределения СКЗ виброскорости по уровню и численные значения, определяющие отличительные особенности его изменения. Эти вычисленные значения можно принять в качестве вектора информативно-значимых параметров для системы поддержки принятия решений по оценке изменения технического состояния контролируемого объекта.



Рис. 3. Результаты обработки суточного временного тренда СКЗ виброскорости подшипника генератора при его нормальной работе

Параметр «Среднее значение виброскорости за период наблюдения» – V_{med} , может быть использован для общей оценки технического состояния контролируемого объекта. Для этого применяется решающая функция [11]:

$$FR(V_{med}) = \begin{cases} 0,25, \ \text{если} \ V_{med} \le V_A; \\ 0,5, \ \text{если} \ V_A < V_{med} \le V_B; \\ 0,75, \ \text{если} \ V_B < V_{med} \le V_C; \\ 1,0, \ \text{если} \ V_C < V_{med}, \end{cases}$$
(1)

где V_A , V_B , V_C – значения СКЗ виброскорости, соответствующие граничным уровням технического состояния, причем $V_A < V_B < V_C$. Конкретные величины этих уровней могут определяться: стандартами; путем анализа изменения вибрационного состояния достаточно большого числа однотипных объектов; на основе экспертных оценок. Уровни обычно отличаются друг от друга на 4–8 дБ.

Если $FR(V_{med}) = 0,25$, то механизм находится в очень хорошем вибрационном состоянии (это обычно новые (после ремонта), прошедшие приработку машины). Если $FR(V_{med}) = 0,5$, то механизм находится в хорошем вибрационном состоянии и может эксплуатироваться без временных ограничений. Если $FR(V_{med}) = 0,75$, то на эксплуатацию механизма накладываются ограничения на допустимое время эксплуатации, обычно от нескольких дней до месяца. Если $FR(V_{med}) = 1$, то состояния механизма аварийно-опасное и требуется оперативное реагирование, вплоть до его остановки.

Однако, предоставляя обобщенную характеристику вибросостояния объекта на длительном временном интервале, параметр V_{med} не отражает возможные изменения интенсивности вибрации на отдельных режимах работы, когда могут наблюдаться её существенные повышения, определяемые «максимальным значением» - V_{max}. При оценке состояния по отношению к V_{тах} также можно применить решающую функцию вида (1), учитывая при этом режимные факторы и предварительно удалив из выборки возможные случайные выбросы. Изменчивость V_{med} характеризуется «СКЗ разброса значений виброскорости за период наблюдения» $-S_{\nu}$, а также диапазоном изменения – V_d. Установить граничные уровни решающей функции для этих параметров значительно сложнее. В качестве S_{VA} , V_{dA} могут быть приняты, увеличенные на 20–25 %, значения S_V , V_d , полученные при эксплуатации новых, приработанных машин, при прохождении ими всех типовых режимов эксплуатации. Границы зон В и С целесообразно выбирать на основе результатов длительной эксплуатации объектов контроля и с учетом экспертных оценок. Рост параметра S_{V} или V_{d} свидетельствует об определенном изменении технического состояния объекта, даже при незначительном увеличении V_{mad} .

Заключение

Непрерывный анализ вибрационного состояния сложного производственного оборудования создает предпосылки для разработки новых способов решения задач оценки технического состояния и диагностики. Аналогичная, рассмотренной, обработка других параметров вибрационных сигналов, которые являются информативными признаками для определенных дефектов, позволяет сделать выводы об их развитии.

Однако следует отметить, что получить хорошие, с практической точки зрения, результаты, используя рассмотренный подход, можно только при обоснованном выборе пороговых уровней для решающих функций по отдельным параметрам, а также весовых коэффициентов при вычислении обобщающих решающих функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. Кн. 2. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – М. : Машиностроение, 2005. – 485 с.

2. ГОСТ ИСО 10816–1–97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. – Введ. 1999–07–01. – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации : ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартинформ, 2007. – 18 с.

3. ГОСТ 25364–97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. – Введ. 1999-07-01. – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации : ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартинформ, 2011.– 12 с.

4. **Бранцевич, П. Ю.** ИВК «Лукомль -2001» для вибрационного контроля / П. Ю. Бранцевич // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 12 (69). – С. 19–21.

5. **Brancevich, P.** Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, Thailand, 7–11 July 2013. – Curran Associates, Inc., NY 12571 USA. – P. 612–619.

6. **Фрэнкс, Б.** Укрощение больших данных: как извлекать знания из массивов информации с помощью глубокой аналитики : пер. с англ. А. Баранова / Б. Фрэнкс. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2014. – 352 с.

7. **Бранцевич, П. Ю.** Большие данные в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 28–41.

8. **Бранцевич, П. Ю.** Методика применения измерительновычислительного комплекса "Тембр-М" при оценке вибрационного состояния механизмов и агрегатов / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2014) : сб. статей IV междунар. заочной науч.-техн. конф. / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : ПВГУС, 2014. – С. 55–67.

9. **Бранцевич, П. Ю.** Решение задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния механизмов и турбоагрегатов с помощью компьютерных комплесов / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Е. Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – С. 148–152.

10. **Бранцевич, П. Ю.** Измерительно-вычислительная система распределенного сбора и централизованной обработки виброметрических данных / П. Ю. Бранцевич // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления : сб. материалов 12-ой науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов / Под ред. В. Н. Азарова. – М. : МГИЭМ, 2000. – С. 170–171.

11. Фор, А. Восприятие и распознавание образов / А. Фор. – М. : Машиностроение, 1989. – 272 с.

E-mail: <u>branc@bsuir.edu.by</u>

УДК 621.382

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С ФОТОПРИЕМНИКОМ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКА С СОБСТВЕННОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. И. СВИСТУН, К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ, Л. И. ШАДУРСКАЯ

Белорусский национальный технический университет Минск, Беларусь

UDC 621.382

THE MEASURING CONVERTER OF SYSTEMS OF OPTICAL DIAGNOSTICS WITH THE PHOTODETECTOR ON THE BASIS OF THE INTRINSIC SEMICONDUCTOR

R. I. VOROBEY, O. K. GUSEV, A. I. SVISTUN, K. L. TYAVLOVSKY, L. I. SHADURSKAYA

Аннотация

Рассмотрены вопросы построения измерительных преобразователей систем дистанционной оптической диагностики. Использование одноэлементных многофункциональных фотоприемников на основе собственных полупроводников с глубокими многозарядными примесями позволяет получить ряд новых количественных и качественных характеристик.

Ключевые слова:

оптическая диагностика, измерительный преобразователь, фотоприемник, собственный полупроводник, многозарядная примесь.

Abstract

Questions of construction of measuring transducers of systems of remote optical diagnostics are considered. Use of single-element multipurpose photodetectors on the basis of intrinsic semiconductors with penetrating multiply charged impurities allows to receive a series of new quantitative and qualitative characteristics.

Key words:

photodetector, intrinsic semiconductor, multiply charged impurities, measuring converter, optical diagnostic.

Введение

Сущность любого из методов оптической диагностики сводится к регистрации абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и т. п. Важной задачей при построении систем оптической диагностики является выбор или разработка чувствительных элементов на основе фотоэлектрических преобразователей, обычно на основе полупроводниковых сенсорных структур. Многообразие свойств объектов контроля требует применения в измерительных преобразователях фотоприёмников с различными функциональными свойствами, чувствительных или нечувствительных к спектральному составу оптического излучения, чувствительных к слабым оптическим сигналам или сохраняющим чувствительность при высокой интенсивности сигнала. В ряде случаев требуется применение фотоприемников чувствительных к нескольким физическим параметрам. Методы оптической диагностики для контроля высокояркостных объектов или с использованием лазеров, характеризующимися большими плотностями мощности оптического излучения, требуют применения фотоприемников, защищенных от оптических перегрузок, имеющих широкий динамический диапазон энергетической характеристики или переключаемые энергетические характеристики. Для ряда методов оптической диагностики изменения мощности оптических сигналов достигают 10⁶-10⁷, а типовые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) характеризуются относительно низким динамическим диапазоном (до 50 дБ) энергетической характеристики [1]. Часто функциональность и диапазоны преобразования существующих ФЭП оказываются недостаточными, что приводит к необходимости в одном диагностическом приборе использовать несколько измерительных преобразователей, содержащих ФЭП с различными диапазонами преобразования и функциональностью. В ряде случаев решение этих проблем становится возможным при использовании ФЭП с расширенными функциональными возможностями [2], позволяющих преобразовывать широкодиапазонные по длине волны и плотности мощности измерительные сигналы без переключения измерительных каналов систем оптической диагностики. Основой применения объемно перезаряжаемых светом и электрическим смещением структур является изменение времени жизни и подвижности неравновесных носителей заряда в результате их перераспределения по уровням рекомбинации и прилипания многозарядной примеси.

Фотоприемники на основе полупроводников с многозарядными примесями

Отличием ФЭП на основе собственного полупроводника от приемников с высокой концентрацией примеси (до 10^{19} см⁻³) является возможность использования особенностей перезарядки глубоких энергетических уровней (ГУ) примесных центров, находящихся в разных зарядовых состояниях. В первом случае достигается высокая чувствительность, но уже при малой плотности мощности наблюдается насыщение передаточной характеристики. Во втором случае насыщения не происходит и при высоких плотностях мощности оптического излучения, но чувствительность фотоприемника существенно ниже. В основе принципа работы фотоэлектрических преобразователей для построения измерительных преобразователей систем оптической диагностики на основе полупроводников с собственной проводимостью лежит физическая интеграция нескольких процессов внутри объема одноэлементной чувствительной приборной поверхностнобарьерной или резистивной структуры (рис. 1). Для формирования таких ФЭП в полупроводник с собственной проводимостью вводится известная многозарядная примесь в заданной концентрации и путем использования механизмов управления зарядовым состоянием глубоких примесных центров (рис. 1, d) при оптической или электрической перезарядке этой примеси в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения продлевается линейность энергетической характеристики до плотностей мощности излучения, превышающих порог насыщения характеристик примесных фотоприемников и, таким образом, реализуется увеличенный динамический диапазон энергетической характеристики фотоприемника.

Поведение энергетических уровней многозарядных примесей связано с сильным взаимодействием зарядов примесных центров [3]. Так, если один из энергетических уровней уже занят электроном, а примесный центр захватывает еще один электрон на вышележащий энергетический уровень, то энергия уровня уже не может проявиться в опытах из-за неразличимости между двумя электронами примесного центра. Действительно, если электрон с нижнего уровня переводить в зону проводимости, то электрон с более высокого уровня перейдет на освободившийся нижний уровень, передавая высвобождающуюся энергию электрону с уровня с нижнего уровня. В результате на ионизацию израсходуется энергия, соответствующая разности энергий зоны проводимости и более высокого уровня. Таким образом, существование более высоких энергетических уровень лежащий ниже



1. Рис. ΦЭП с на основе полупроводников собственной фотопроводимостью: а – фоторезистивная структура; b – барьерная структура с барьером Шоттки; с – барьерная структура с двумя встречно включенными барьерами Шоттки; энергетическая диаграмма d собственного полупроводника, легированного глубокой примесью с несколькими зарядовыми скобках) : 1 – полупроводник с состояниями (отмечены в глубокой полупрозрачный многозарядной примесью; 2 _ омический контакт: 3 – омический контакт; 4 – полупрозрачный барьер Шоттки; 5 – барьер Шоттки, 6 – область пространственного заряда (ОПЗ)

Например, фоточувствительность германия с примесью, формирующей три зарядовых состояния (-1, -2, -3), определяется энергетическими переходами на глубокие уровни E_1 и E_2 (рис. 1,d). При мощности оптического излучения $P < P_L$ большинство примесных ионов находится в зарядовом состоянии (-3), а концентрация зарядовых состояний (-2) и (-1) существенно меньше, и реализуется энергетический переход 1 с уровня E_2 (рис. 1, d, рис. 2). При мощности оптического излучения P> P_H большинство ионов многозарядной примеси находятся в зарядовом состоянии (-1), включается энергетический уровень E_1 , а уровень E_2 не работает. При последовательном заполнении уровней многозарядной примеси во время освещения с увеличивающейся плотностью мощности реализуется передаточная характеристика (рис. 3), обусловленная суммой зависимостей заполненности уровней E_1 и E_2 . Таким образом, при изменении мощности оптического излучения производится изменение концентрации зарядовых состояний примеси с разными энергиями ионизации и автоматическое переключение между уровнями по мере их заполненности, соответственно мощности оптического излучения. Результатом является расширение динамического диапазона чувствительности ФЭП (рис. 3). Отметим, что внутри поддиапазонов Р>Р_Н и Р<Р_L энергетическая характеристика фотоприемника линейна, а внутри поддиапазона P_L<P<P_H вид энергетической характеристики может отличаться от линейной. Положение конкретной энергетической характеристики ФЭП внутри пространства обобщенных характеристик (рис. 3), границы поддиапазонов чувствительности, определяются типом материала полупроводника и примеси, ее концентрацией.



глубокой примесью *Au* глубокой примесью Параметрами ФЭП в областях энергетической характеристики I и II, можно управлять как на стадии изготовления фотоприёмной структуры, так и в уже готовой структуре используя, например, дополнительные воз-

действия (освещение или электрическая инжекция через управляющий электрод). Положение границ областей P_L и P_H можно синхронно изменить на несколько десятичных порядков при изменении концентрации примеси, например, в структуре (*Ge*(*Cu*)) от 10¹² до 10¹⁵ сm⁻³ [2, 4].

Изменение интенсивности управляющей подсветки на длине волны λ_0 из области собственного поглощения позволяет изменять относительную чувствительность ФЭП (рис. 1, *a*) к излучению в диапазоне длин волн $\lambda_1...\lambda_n$ из области примесного поглощения. В зависимости от плотности мощности оптического сигнала (дополнительного из области собственного поглощения, или основного) реализуются различные зарядовые состояния многозарядной примеси и, соответственно, спектральные характеристики чувствительности с максимумами на длине волны λ_1 или λ_2 (рис. 4), переключаемые под воздействием управляющего излучения с длиной волны $\lambda_{0,}$ причем при работе с интенсивностью управляющего излучения $P > P_H$ также существенно расширяется и динамический диапазон чувствительности ФЭП. Переключение производится за время порядка постоянной времени рекомбинации ($10^{-5}-10^{-8}$ с), в зависимости от материала ФЭП и уровня оптического сигнала. Одновременно с переходом от одной линейной области к другой (I и II) и переключением спектральной характеристики чувствительности происходит и изменение быстродействия фотоприёмника.



Рис. 4. Зависимость постоянной времени переключения фоторезистивного ФЭП от уровня оптического возбуждения

В случае легирования акцепторной примесью времена рекомбинации τ_n и τ_p при изменении мощности оптического излучения (уровня инжекции) изменяются на несколько десятичных порядков, что приводит к тому, что при переходе на другой поддиапазон энергетической и спектральной характеристик, также существенно изменяется и быстродействие фотоприёмника (рис. 5).



Рис. 5. Переключение спектральной характеристики фотоприемника с глубокой многозарядной примесью при дополнительной подсветке с длиной волны λ_0

Использование фотоприемников с встречно включенными барьерами Шоттки (рис. 1, с) предоставляет ряд функциональных преимуществ, позволяя при использовании одноэлементного ФЭП определять и мощность оптического излучения, и его длину волны без каких-либо диспергирующих элементов [2], что существенно упрощает конструкцию измерительного преобразователя. Модуляция оптического излучения значениями длин волн и мощности позволяет анализировать пространство информационных сигналов J, λ. Приборные структуры с двумя потенциальными барьерами, разделенными длинной базой с глубокими многозарядными примесями в ОПЗ, демонстрируют немонотонную зависимость выходного сигнала *i* от длины волны λ , интенсивности света *J*, величины приложенного напряжения V и геометрического смещения Δz , спроецированного изображения от фронтальной к тыльной плоскости структуры. Такая структура представляет собой по существу функциональный преобразователь, в котором взаимосвязь четырех параметров $J, \lambda, V, \Delta z$ дает возможность функционального выражения одной физической величины (или совокупности нескольких величин) через другую. Структура многофункционального измерительного преобразователя (рис. 6) в общем случае может включать совокупность одного или нескольких конструктивно объединенных чувствительных элементов, размещенных в зоне действия нескольких физических величин, а также формирующих соответствующие сигналы посредством преобразовательных (передаточных) функций.



Рис. 6. Схема измерительного преобразователя системы оптической диагностики с ФЭП на основе собственного полупроводника с многозарядной примесью

Многофункциональные ФЭП можно применить в различных оптических схемах обработки сигнала, например, схеме синхронного оптического детектора, реализующего передачу и информационного и опорного сигнала синхронизации одним оптическим сигналом, причем информационный сигнал передается, например, параметром "мощность оптического сигнала", а сигнал синхронизации – параметром "длина волны оптического сигнала".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Формозов, Б. Н.** Аэрокосмические фотоприёмные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах / Б. Н. Формозов. – СПб. : СПбГУАП, 2002. – 120 с.

2. Vorobey, R. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. Vorobey [et.al.] // Przeglad Elektrotechniczny. – 2015. – N_{2} 8 – P. 81–85

3. Ali, A. Influence of deep level defects on the performance of crystalline silicon solar cells: experimental and simulation study / A. Ali // Solar Energy Materials & Solar Cells. -2011. - T.95, No 10. - P.2805-2810.

4. **Яшин, А. Н**. Применимость упрощенной модели Шокли-Рида-Холла для полупроводников с различными типами дефектов / Электронные и оптические свойства полупроводников / А. Н. Яшин // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 11. – С. 1331–133.

5. Aslan, B. Double-barrier long wavelength SiGe/Si heterojunction internal photoe-mission infrared photodetectors / B. Aslan [et. al.] // Appl. Phys. B: Lasers and Optics. -2004. -Vol. 78, No 2. -P. 225–228.

E-mail: nil pt@bntu.by

УДК 621.317.2

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

С. А. ГРИШИН, В. В. КЛИМЕНТОВСКИЙ

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Минск, Беларусь

UDC 621.317.2 APPLICATION OF MULTISENSOR SYSTEM FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND ENGINE UNITS MONITORING S. A. GRISHIN, V. V. KLIMENTOVSKI

Аннотация

Представлены результаты применения мультисенсорной системы для исследования физических полей, создаваемых при работе технологической установки аддитивного синтеза материалов и модельных жидкостных ракетных двигателей.

Ключевые слова:

мультисенсорная система мониторинга; сложные технические системы; преобразователь переменного магнитного поля; преобразователь переменного электрического поля, установка аддитивного синтеза, реактивный двигатель.

Abstract

The results of application of multisensor system for investigation of physical fields created by operation of technological installation for additive synthesis of materials and model liquid-propellant rocket engines are presented.

Key words:

multisensor monitoring system; complex technical systems; alternating magnetic field transducer; alternating electric field transducer, installation for additive synthesis, jet engine.

Технологические установки и силовые агрегаты представляют собой сложные технические системы, которые обычно подразумевают постоянный мониторинг их технического состояния и режимов работы. В состав таких систем входят разнородные узлы, для которых могут быть характерны дефекты и неисправности различных типов, поэтому наиболее эффективно мониторинг такого оборудования выполнять при помощи мультисенсорных систем для контроля и диагностики, которые позволяют регистрировать различные диагностические характеристики в режиме реального времени, предпочтительно, дистанционно и бесконтактно и не требующих проведения доработок и вмешательства в конструкцию оборудования для установки датчиков и узлов системы. Поскольку во время работы технологические установки и силовые агрегаты становятся источниками различных физических полей, параметры которых могут нести информацию о процессах, происходящих в оборудовании, то актуальным оказывается исследование возможностей построения систем мониторинга с использованием бесконтактных электромагнитных, оптических, тепловых, акустических, вибрационных и других методов и средств контроля [1, 2]. В ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» разработан программноаппаратный комплекс, который позволяет регистрировать величины: компонент вектора напряженности переменного магнитного поля; напряженность переменного электрического поля; спектры оптического излучения факела реактивного двигателя; параметры теплового поля; видеоданные процесса проведения испытаний; вибрации и звуковые колебания. Практическая отработка элементов программно-аппаратного комплекса с целью исследования возможностей мониторинга техпроцессов и режимов работы оборудования проводилась на установке лазерного спекания материалов УЛПС-1 ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси (рис. 1). А на стенде филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнена регистрация информативных параметров при проведении огневых испытаний модельных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) (рис. 2). При этом измерялись переменные магнитные и электрические поля и регистрировались спектры оптического излучения факела ЖРД.



Рис. 1. Размещение магнитной антенны (1) и индукционного преобразователя (2) магнитного поля в рабочей камере установки при регистрации переменных магнитных полей, создаваемых при работе вибросистемы формования порошкового слоя



Рис. 2. Размещение на испытываемом модельном ЖРД преобразователей переменного магнитного и электрического полей и вибродатчика
Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 3–7. Приведенные на рис. 4–6 спектры показывают, что параметры магнитных полей, создаваемых при работе разных узлов установки лазерного спекания материалов существенно различаются. Анализ полученной измерительной информации, представленной на рис. 7, показывает очевидную взаимосвязь между параметрами работы модельного ЖРД и характеристиками регистрируемых вблизи от ЖРД электрического и магнитного полей. Регистрация и анализ спектрального состава излучения факела испытываемого ЖРД до начала и во время разгара вкладыша критического сечения позволили зафиксировать появление спектральных линий, связанных с излучением выносимых из газового тракта двигателя материалов.



Рис. 3. Зависимость напряжения на выходе магнитной антенны от установленной мощности вибрации системы формования порошкового слоя



Рис. 4. Размещение магнитной антенны (2) вблизи от двигателя (1) во время проведения измерений при работе системы позиционирования и полученный при этом спектр напряженности магнитного поля в диапазоне частот до 2 кГц



Частота, Гц

Рис. 5. Размещение магнитной антенны (1) внутри рабочей камеры (2) при генерации импульсного лазерного излучения и полученный при этом спектр магнитного поля в диапазоне частот до 2 кГц



Частота, Гц

Рис. 6. Размещение магнитной антенны (1) над резонатором (2) лазера при генерации импульсного лазерного излучения и полученный при этом спектр магнитного поля в диапазоне частот до 2 кГц



Рис. 7. Профиль изменения давления в камере сгорания ЖРД (1) и осциллограмма сигнала с преобразователя переменного магнитного поля (2)

Установленная зависимость напряженности магнитного поля и электрического поля от давления в камере сгорания модельного ЖРД, близка к линейной и может быть использована в качестве диагностического признака при разработке быстродействующей системы аварийной защиты ЖРД. Зависимость напряженности магнитного поля в рабочей камере установки лазерного спекания материалов от заданной мощности вибрации системы формования порошкового слоя также близка к линейной и может быть использована в качестве диагностического признака при разработке системы мониторинга технического состояния и режимов работы технологической установки. Результаты анализа полученных данных и зависимостей характеристик электрических и магнитных полей от технологических параметров подтверждают перспективность применения электромагнитных средств и методов контроля при разработке систем мониторинга и технической диагностики реактивных двигателей и технологических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гришин, С. А.** Интеллектуальные модули цифровой регистрации электромагнитных излучений высокотемпературных плазменных потоков / С. А. Гришин, В. В. Климентовский // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 4-й междунар. науч.-техн. конф. / редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 338–339.

2. Гришин, С. А. Система сбора и обработки сигналов переменных магнитных полей реактивных двигателей / С. А. Гришин, В. В. Климентовский // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVI междунар. науч.-техн. конф., Т. 2 / под ред. Л. И. Сучковой. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 51–54.

E-mail: grsamail@mail.ru inel@tut.by

УДК 621.317.422:593.816.2:621.318.1

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОКОВ БОРТОВОГО СПЕКТРОМЕТРА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

С. А. ГРИШИН, В. А. СЕЛЯНТЬЕВ, Н. С. НЕДВЕЦКИЙ, *С. В. КОЛДАШОВ, *С. Ю. АЛЕКСАНДРИН

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Минск, Беларусь; Москва, Россия

UDC 621.317.422:593.816.2:621.318.1

HARDWARE AND SOFTWARE MEANS FOR GROUND TESTING OF ON-BOARD IONIZATION RADIATION SPECTROMETER UNITS S. A. GRISHIN, V. A. SELIANTIEV, N. S. NEDVETSKI, S. V. KOLDASHOV, S. Y. ALEKSANDRIN

Аннотация

Представлены результаты разработки, испытаний и применения аппаратнопрограммного комплекса, предназначенного для диагностики технического состояния, наладки и контроля функционирования блоков бортового мультидетекторного сцинтилляционного спектрометра излучений и частиц околоземного космического пространства. Работы выполнены в рамках российскобелорусского сотрудничества по научно-технической программе Союзного государства «Мониторинг – СГ».

Ключевые слова:

контрольно-испытательная аппаратура, мультидетекторный сцинтилляционный спектрометр, ионизирующее космическое излучение, наземные испытания бортовой спутниковой научной аппаратуры.

Abstract

Results of development, testing and application of hardware and software complex intended for diagnosing technical condition, adjustment and monitoring of operation of blocks of on-board multi-detector scintillation spectrometer of emissions and particles of near-Earth space are presented. The work was carried out within the framework of Russian-Belarusian cooperation on scientific and technical program of the Union State "Monitoring – SG".

Key words:

control and testing equipment, multidetector scintillation spectrometer, ionizing cosmic radiation, ground tests of on-board satellite scientific equipment.

Введение

Характеристики и надежность бортовой спектрометрической аппаратуры, предназначенной для мониторинга ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве, в значительной степени зависят от качества и полноты проведения наземных испытаний и калибровок, требующих значительных временных и материальных затрат. Сокращения этих затрат можно добиться путем применения аппаратно-программных средств контроля [1–2], позволяющих проводить диагностику технического состояния разрабатываемой аппаратуры в автоматическом режиме.

Комплекс средств тестирования

В ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси совместно с Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ» был разработан и изготовлен экспериментальный образец комплекса средств тестирования (КСТ), показанный на рис. 1, который позволяет автоматизировать процессы испытаний и контроля, упрощает разработку и отладку алгоритмического и программного обеспечения, сокращает время и трудоемкость диагностики блоков мультидетекторного бортового сцинтилляционного спектрометра.

Комплекс средств тестирования обеспечивает:

- питание блоков спектрометра;

– тестирование блоков сцинтилляционного спектрометра;

– проведение отбора логических сигналов и формирование триггерных сигналов;

– контроль телеметрии;

– сбор, накопление, передачу массивов информации по каналам телеметрии и протоколирование результатов испытаний.



Место рабочее оператора



Блок программно-аппаратных средств

Рис. 1. Комплекс средств тестирования



Блок имитации: 1 – блок дискриминаторов;2 – блок каналов связи; 3 – блок преобразователей; 4 – источник питания высоковольтный; 5 – источник питания низковольтный



Регистрирующие приборы

В состав разработанного и изготовленного экспериментального образца КСТ входят следующие блоки (рис. 2): блок электроники, состоящий из блока программно-аппаратных средств А4 и блока имитации. В блок имитации входят блок каналов связи А5, блок дискриминаторов А6, блок преобразователей А7, источник питания низковольтный А8, источник питания высоковольтный А9; место рабочее оператора А1; регистрирующие приборы А2, А3, А10.



Рис. 2. Схема структурная комплекса средств тестирования

Технические характеристики:

- количество входных каналов 44;
- количество контролируемых параметров 17;
- количество команд управления -15;
- мощность потребления –450 Вт.

Программное обеспечение

Программное обеспечение КСТ, состоит из программы оператора и программы для управления блоком программно-аппаратных средств ПАС (рис. 3). Программное обеспечение позволяет задавать режимы работы КСТ, вести обработку и регистрацию поступающей информации, сохранять и выводить результаты на экран и бумажный носитель в виде графиков, таблиц и протоколов испытаний. В состав программного обеспечения входят описания аппаратуры VHDL для функционирования программируемой логики в составе блока ПАС. Управление КСТ осуществляется с персонального компьютера под управлением операционной системы Windows 7, с предустановленным программным обеспечением КСТ.exe. Взаимодействие между программой оператора и программой блока ПАС осуществляется с твие между программой оператора и программой блока ПАС осуществляется.



Рис. 3. Структура программного обеспечения: а – структура программы оператора; б – структура программы блока программно-аппаратных средств

Для взаимодействия программы оператора с программой блока ПАС применен протокол, в котором команды и данные передаются в виде ASCII символов.

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс испытаний блоков спектрометра (рис. 4).



Рис. 4. Испытания блоков спектрометра с помощью комплекса средств тестирования: а – испытываемый бортовой спектрометр; б – проверка функционирования многослойного сцинтилляционного детектора; в – схема расположения сцинтилляторов в многослойном детекторе В меню главного окна программы КСТ (рис. 5), можно выбрать проверяемый блок, настроить параметры испытательных сигналов и запустить процесс тестирования.



Рис. 5. Главное окно программы для задания режимов и отображения результатов тестирования

Испытания блоков спектрометра показали полезность и высокую эффективность применения разработанного экспериментального образца комплекса средств тестирования. Достигнуто существенное уменьшение трудоемкости выполнения операций контроля основных параметров испытываемой аппаратуры при одновременном повышении качества выполняемых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппаратно-программные средства для наземной отработки бортовых спектрометров заряженных частиц / А. Г. Батищев [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5, № 3. – С. 247–256.

2. Создание и применение контрольно-испытательной аппаратуры для проведения экспериментальных исследований и отработки методов калибровки космофизических спектрометров / С. А. Гришин [и др.] // V конгресса физиков Беларуси : сб. науч. тр., 27–30 окт. 2015 г. – Минск : Изд-во Ковчег, 2015. – С. 239–240.

E-mail: grsamail@mail.ru

УДК 620.179.143.5 : 629.5.015.4

ПРИМЕНЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ КОРПУСОВ

О. П. ЗАВАЛЬНЮК, В. Б. НЕСТЕРЕНКО

Херсонская государственная морская академия Херсон, Украина

UDC 620.179.143.5 : 629.5.015.4

APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING IN MARINE TRANSPORT TECHNOLOGIES AT OPERATION OF SHIP'S HULLS O. P. ZAVALNIUK, V. B. NESTERENKO

Аннотация

Авторами отмечена актуальность контроля механических напряжений, действующих в несущих судовых конструкциях в режиме реального времени. Рассмотрены существующие средства контроля прочности судна в процессе его эксплуатации. Обосновано, исходя из собственных экспериментальных наработок, применение современных магнитных методов неразрушающего контроля в морских транспортных технологиях.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, судовой корпус, техническое состояние, остаточный ресурс.

Abstract

The monitoring topicality of mechanical stresses acting in bearing ship structures in real time is noted by the authors. Existing means of ship's hull strength control during its operation are considered. Based on its own experimental developments, the use of modern magnetic methods of non-destructive testing in marine transport technologies is substantiated.

Key words:

non-destructive testing, ship's hull, technical condition, residual life.

Введение

Основной целью существующих требований к технической эксплуатации судовых корпусов является безопасность мореплавания и сохранность перевозимых грузов [1, 2], т. е. корпус судна, его элементы, а также закрытия отверстий необходимо содержать в состоянии, которое обеспечивало бы их прочность и непроницаемость. Судовые корпусные конструкции, к которым относят [1]: набор, обшивку, настилы судовых перекрытий, надстройки и др., представляют собой элементы, обеспечивающие прочность, устойчивость и непотопляемость судна. Таким образом, приоритетной обязанностью экипажа является ежедневное техническое обслуживание корпусных конструкций и своевременное устранение обнаруженных дефектов.

Актуальность исследований

Несмотря на выше сказанное, в мировом морском флоте достаточно часты аварии, связанные с потерей общей продольной и (или) местной прочности [3, 4]. За последние несколько лет среди наиболее тяжелых катастроф судов необходимо отметить: т/х «ВАСИЛИЙ» (2010 г.), т/х «MOL COMFORT» (2013 г.), т/х «STELLAR DAISY» (2017 г.), т/х «ГЕРОИ АРСЕНАЛА» (2017 г.). Одной из причин таких аварий является то, что в процессе эксплуатации судна отсутствовал контроль величины и распределения механических напряжений, действующих в несущих судовых конструкциях в режиме реального времени.

Анализ предыдущих исследований

В первую очередь, согласно Правилам Класса [2, 5] к средствам контроля прочности при эксплуатации судна относятся «Инструкция по загрузке и прибор контроля загрузки», с помощью которых можно определить, что изгибающие моменты и перерезывающие силы на тихой воде, а также скручивающие и поперечные нагрузки при любом состоянии загрузки судна не превышают допускаемых значений [6].

Инструкция по загрузке представляет собой одобренный Классом документ, содержащий [2]: «варианты загрузки; допускаемые значения изгибающих моментов и перерезывающих сил на тихой воде и, если требуется, ограничения, связанные со скручивающими и поперечными нагрузками; результаты расчетов изгибающих моментов и перерезывающих сил на тихой воде для вариантов загрузки; допускаемые местные нагрузки на отдельные конструкции (люковые крышки, палубы, двойное дно и т. п.)».

Прибор контроля загрузки [2] представляет собой одобренное Классом устройство аналогового или цифрового типа, позволяющее контролировать в заданных поперечных сечениях по длине судна изгибающие моменты и перерезывающие силы на тихой воде, а также, если требуется, крутящие моменты и поперечные нагрузки при любом состоянии загрузки судна. Согласно [2] прибор контроля загрузки представляет собой систему, основанную на применении компьютера, состоящую из программы расчета загрузки судна [7] и аппаратного обеспечения для ее реализации (компьютера). Программа должна обеспечивать расчет сил и моментов в корпусе судна в соответствии с требованиями части II «Корпус» [5].

Наряду с использованием «Инструкция по загрузке и прибора контроля загрузки судна» были попытки внедрить на суда и ряд других методов контроля прочности [8], основанных на различных физических принципах действия: тензометрический, оптический, магнитоупругий и т.п.

При тензометрическом методе контроля механических напряжений конструкций применялись тензорезисторы, действие которых основано на явлении тензоэффекта [8, 9]. В оптическом методе, как правило, применялись волоконно-оптические тензометры, которые по сравнению с провод-

никовыми тензорезисторами имели следующие преимущества [8, 10]: высокое быстродействие и чувствительность, невосприимчивость к коррозии и воздействию электромагнитных полей, устойчивость к радиопомехам, водонепроницаемость, небольшие размеры и малый вес.

Применяя магнитоупругий метод контроля, проводились измерения механических напряжений, которые возникали в судовых корпусных конструкциях, с помощью трансформаторных магнитоупругих преобразователей (МУП) [11]. Здесь чувствительным элементом являлся непосредственно участок корпуса судна. В процессе эксплуатации морского судна МУП включались в стационарную многоканальную систему контроля. Система выполняла автоматические измерения механических напряжений судового корпуса, а также сбор сигналов с датчиков, установленных непосредственно на корпусе навалочного судна.

Описанные выше методы контроля прочности корпуса, по ряду причин [8], не нашли широкого применения на морских судах.

Методы неразрушающего контроля (НК) в судоремонте стали применяться еще в 70-х годах прошлого столетия [12, 13], среди которых широко распространенными являлись: капиллярные, магнитопорошковые, вихретоковые, ультразвуковые, рентгеновские и гаммаизотопные. Существенным недостатком указанных методов является невозможность их применения на судне без вывода его из эксплуатации. Такая дефектоскопия требовала особенной и тщательной подготовки контролируемых поверхностей, использования специальных материалов, определенной квалификации персонала. К тому же перечисленные методы НК обладали неодинаковой чувствительностью к выявляемым дефектам.

Целью настоящего исследования является обоснование применения современных методов неразрушающего контроля в морских транспортных технологиях в процессе эксплуатации судовых корпусов.

Результаты исследований. Анализ существующих методов НК [13, 14] показал, что для контроля судовых конструкций эффективными могут быть те методы НК, которые успешно используются на береговых объектах и надежно зарекомендовали себя. В то же время было установлено, что современные средства контроля механических напряжений ферромагнитных стальных конструкций очень часто базируются на магнитных методах НК [13]. Это связано с тем, что при воздействии на ферромагнетики больших растягивающих или сжимающих упругих напряжений могут существенно изменяться значения некоторых магнитных характеристик ферромагнитных материалов.

Исходя из этого, авторами были детально изучены теоретические основы магнитных методов НК, особенно коэрцитиметрического метода контроля и метода остаточной намагниченности [8]. В течение 7 лет, применяя данные методы, было исследовано 13 морских судов на тихой воде, в условиях волнения и в ходе грузовых и балластных операций, проведены экспериментальные измерения, разработаны методики контроля. Так в ходе мониторинга технического состояния несущих элементов конструкции судна на них размещаются датчики, с помощью которых измеряется магнитная характеристика материала (коэрцитивная сила), значение которой используется для оценки технического состояния несущих элементов судна. В качестве датчиков магнитной характеристики применяются датчики коэрцитивной силы. При этом, предварительно измеряется значение коэрцитивной силы материала несущих элементов, расположенных вдоль судна. Далее определяется распределение коэрцитивной силы материала несущего элемента вдоль судна в условиях эксплуатационных нагрузок, по которому устанавливаются критические зоны с максимальным значением коэрцитивной силы. Теперь при проведении мониторинга датчики магнитной характеристики материала размещаются в этих, предварительно установленных критических зонах. В процессе мониторинга грузовых судов в качестве несущего элемента при установлении распределения коэрцитивной силы материала используются комингсы трюмов.

Критические зоны максимальных значений магнитной характеристики и зоны размещения датчиков могут определяться предварительно в процессе опытной эксплуатации судна в штормовых условиях. Кроме того, такие зоны заранее могут устанавливаться и в процессе проведения грузовых или балластных операций, либо в порожнем и загруженном состояниях судна.

На рис. 1 представлен график распределения коэрцитивной силы вдоль комингсов трюмов грузового судна от шпангоута №50 – в кормовой части до шпангоута № 210 – в носовой части (номера шпангоутов не указаны).



Рис. 1. График распределения коэрцитивной силы вдоль комингсов трюмов грузового судна: А, Б, В, Г, Д – критические зоны несущих судовых конструкций

Схема расположения датчиков коэрцитивной силы вдоль комингсов трюмов грузового судна изображена на рис. 2.

444



Рис. 2. Схема расположения датчиков коэрцитивной силы вдоль комингсов трюмов грузового судна: 1 – корпус судна; 2 – комингс трюмов; 3 – датчики коэрцитивной силы

Одним из методов, не требующим предварительного воздействия на металл корпуса судна каким-либо видом физического поля, является магнитометрический метод, позволяющий использовать магнитное поле Земли, в котором находится судно. Установлено, что величина остаточной намагниченности в определенной степени зависит от величины механических напряжений в металле. Контроль остаточной намагниченности корпуса судна, находящегося в эксплуатации, потребовал создания специального магнитоизмерительного комплекса [8]. Для измерения величины остаточной намагниченности на поверхности судна наиболее перспективными являются магнитомодуляционные преобразователи – феррозонды [13, 14].

Авторы для решения задач контроля технического состояния несущих элементов конструкции судна также имели опыт применения сравнительно нового метода диагностики оборудования и конструкций, основанный на использовании магнитной памяти металла с использованием, так называемого, измерителя концентрации напряжений.

Выводы

Таким образом, наиболее перспективными методами НК в морских транспортных технологиях, авторы считают магнитные методы.

В дальнейшем разработку и развитие данного направления необходимо проводить так, чтобы перейти от контроля величины механических напряжений к определению остаточного ресурса работы контролируемого объекта – корпуса судна. При этом результаты обследования корпусных конструкций не должны зависеть от квалификации специалиста, который проводит контроль.

Полезными последующими методическими и техническими наработками на основе приобретенного практического опыта является обеспечение объективности контроля, разработка средств диагностики и прогнозирования технического состояния судовых корпусов, возможность создания паспортов технического состояния морских транспортных судов.

Авторы настоящего исследования открыты к новым предложениям и техническим решениям ведущих специалистов неразрушающего контроля, направленные на повышение эффективности контроля прочности морских судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящий технический материал. РТМ 31.2003-77 «Корпус, помещения, устройство и системы судна. Правила технической эксплуатации». ЦРИА «Морфлот». Министерство морского флота СССР, 1988. – 97 с.

2. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. НД N 2-020101-044. Т. 4. Часть XVIII. «Общие правила по конструкции и прочности навалочных судов». – СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2006. – 475 с.

3. Casualty Report [Электронный ресурс] / The International Association of Dry Cargo Shipowners. INTERCARGO. – Режим доступа к сайту: <u>http://www.intercargo.org/</u>. – Название с экрана.

4. Ship Structure Committee Case Study [Электронный ресурс] / Ship Structure Committee. – Режим доступа к сайту: <u>http://www.shipistructure.org/</u>. – Название с экрана.

5. Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. НД № 2-020101-082. Т. 1. – СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2015. – 505 с.

6. Максимаджи, А. И. Капитану о прочности корпуса судна : справочник / А. И. Максимаджи. – Л. : Судостроение, 1988. – 224 с.

7. K-LOAD. Loading with strength and stability [Электронный ресурс] / KONGSBERG MARITIME. – Режим доступа к сайту: <u>http://www.km.kongsberg.com/</u>. – Название с экрана.

8. **Мирошников, В. В.** Контроль прочности корпуса судна : моногр. / В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко. – Херсон : Гринь Д. С., 2015. – 108 с.

9. Денисенко, В. В. Датчики на основе тензорезисторов и принципы их применения в измерениях / В. В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – М. : СТА, 2013. – № 4. – С. 88–92.

10. Strain Sensor Equipment [Электронный ресурс] / Roctest Ltd (Canada). – Режим доступа к сайту: <u>http://www.roctest.com/Products/Strain/</u>. – Название с экрана.

11. **Королев, В. В.** Система измерений и контроля напряжений в корпусе судна с магнитоупругими преобразователями : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб. : 2010. – 24 с.

12. Машиностроение. Энциклопедия. Расчет и конструирование машин. Раздел IV. Корабли и суда. Т. IV-20. Проектирование и строительство кораблей, судов и средств океанотехники. Кн. 2 / В. Т. Томашевский [и др.]; под ред. В. Т. Томашевского, В.М. Пашина. – СПб. : Политехника, 2004. – 882 с.

13. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев [и др.] / Под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.

14. Механіка руйнування і міцність матеріалів : довідн. посібник / Під загальною ред. В. В. Панасюка. – Київ : Наук. думка, 1988. Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.

E-mail: <u>olgazavalnjuk82@gmail.com</u> <u>nesterenko_mast@mail.ru</u>

УДК 621.7 ГИБРИДНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Е. А. ЗАЙЦЕВ, А. С. ЛЕВИЦКИЙ, *В. Е. СИДОРЧУК

Институт электродинамики НАН Украины *Киевский национальный торгово-экономический университет Киев, Украина

HYBRID FIBER-OPTIC METERS OF MECHANICAL PARAMETERS FOR ELECTRICAL EQUIPMENT FAULT DIAGNOSTICS SYSTEMS I. O. ZAITSEV, A. S. LEVYTSKYI, V. I. SYDORCHUK

Аннотация

Описана структура гибридного волоконно-оптического измерителя (ГВОИ) контрольно-диагностических параметров электрооборудования. Предложено для передачи питания к первичным преобразователям, размещенным в изолированной зоне, использовать информационно-энергетический канал, реализованный на основе технологий "Wavelength-Division Multiplexing".

Ключевые слова:

гидрогенератор, контрольно-диагностические параметры, гибридный волоконно-оптический измеритель, емкостной сенсор, информационноэнергетический канал.

Abstract

In this paper was proposed the structure of hybrid fiber-optic meter of electrical equipment parameters for control and diagnostics systems. For power transfer to the primary converters located in the isolated zone, use the information-energy channel, implemented on the basis of the technologies "Wavelength-Division Multiplexing".

Key words:

hydrogenerator, control and diagnostic parameters, hybrid fiber-optic meter, capacitive sensor, information-energy channel, electrical equipment.

Путём повышения производительности нового и уже существующего электрооборудования (ЭО) является создание новых методов и средств технической диагностики ЭО. Особенностью технической диагностики является использование гаммы специализированных измерительных преобразователей для регистрации контрольно-диагностических параметров, характеризующих работу оборудования. При использовании специализированных измерительных преобразователей на работающем энергетическом оборудовании присутствует ряд проблем, препятствующих получению высокой точности при измерении диагностических параметров, возникает необходимость обеспечения помехоустойчивости к воздействию мощных электромагнитных полей. Задача повышения помехоустойчивости первичных измерительных преобразователей, линий передачи информации и вторичных преобразователей может быть решена за счет применения волоконно-оптических световодов.

Следует отметить, что применение сенсоров, построенных на испольоптических эффектов качестве первичных В волоконнозовании оптических преобразователей физических параметров, в энергетическом оборудовании затруднено рядом недостатков. Один из них – это низкий уровень стандартизации и унификации оптических чувствительных элементов. Для их создания используются специализированные оптические элементы и волокна, технология изготовления которых еще недостаточно освоена [1]. Кроме того, обеспечение заданных метрологических характеристик требует сложной процедуры калибровки. Как результат – относительно высокая стоимость, что значительно ограничивает широкое применение. С другой стороны, подавляющее большинство специализированных первичных преобразователей емкостного типа [2] обеспечивают необходимые метрологические характеристики.

Поэтому перспективным для построения систем технической диагностики энергетического оборудования является использование гибридных волоконно-оптических измерителей (ГВОИ) [1, 3, 4]. ГВОИ конструктивно состоят из волоконно-оптического канала (ВОК) и традиционных сенсоров, как чувствительных элементов (первичных преобразователей).

При реализации систем технической диагностики электрооборудования с ограничениями на количество линий, или с ограничениями на общий диаметр таких линий, целесообразно использование информационноэнергетических (ИЭ) ВОК, в которых передача информации и питания путем волнового оптического мультиплексирования WDM (Wave division multiplexing) [5–7] осуществляется по совместному волоконнооптическому кабелю.

Целью доклада является обзор технического решения для практической реализации гибридных волоконно-оптических сенсоров измерителей контрольно-диагностических параметров систем технической диагностики электрооборудования с питанием через общий волоконно-оптический канал.

Применение ВОК в структуре систем технической диагностики позволяет достичь:

1) высокого уровня защищенности от воздействия внешних электромагнитных полей и межканальных наводок;

2) уменьшение габаритов и массы по сравнению с использованием металлических линий проводной связи в 3–5 раз;

3) взрывобезопасности благодаря возможности использования специальных типов ВОК в среде с температурой самовоспламенения до 450– 600° С (смесь водорода, метана, пропана и подобных газов с воздухом) [1]; 4) *повышение достоверности* контроля благодаря получению информации о состоянии отдельных узлов в виде кодированных световых сигналов;

5) низкий уровень шумов, как результат передачи измерительной информации через ВОК;

6) секретности передачи информации: излучение в окружающее пространство ВОК почти отсутствует, а изготовление отводов оптической энергии без разрушения кабеля невозможно;

7) потенциально *низкой стоимости* (замена дорогих цветных металлов (медь, свинец) на материалы с неограниченным сырьевым ресурсом (стекло, кварц, полимеры) для изготовления ВОК).

Использование технологии WDM позволяет, по сравнению с традиционными разделенными BOK, для передачи измерительной информации и питания получить ряд преимуществ:

– обеспечение объединенного передачи энергетического питания, данных управления и измерительной информаций;

– обеспечение повышенной информационной защищенности канала;

- повышение пропускной способности ВОК;

- возможность организации двусторонней связи;

– наращивание информационной емкости уже проложенных оптических линий связи;

– осуществление передачи различных видов данных на разных несущих волнах от различных типов первичный преобразователей к общей системе управления работой ГВОИ;

– использование оптического волокна (Ø 200–1000 мкм), в котором кроме передачи информации реализуется передачи энергии питания оптическим потоком высокой мощности путем волнового оптического мультиплексирования.

В [6] описано использование ИЭ ВОК, который функционирует аналогично обычной волоконно-оптической линии, за исключением того, что в устройстве предусмотрено полностью автономное дистанционное питание приемного блока от оптического энергетического канала при оптической мощности $P_{pow} = 90$ мВт на длине волны $\lambda_{pow} = 785$ нм при этом для передачи данных использованы длина волны $\lambda_{inf} = 658$ нм и мощность $P_{inf} = 5$ мВт.

Если использовать емкостные сенсоры [8] как первичные преобразователи в системах технической диагностики при контроле изменения физических параметров узлов гидрогенераторов, то по описанному принципу [5, 6, 9] можно реализовать ГВОИ воздушного зазора между статором и ротором, биения вала, усилия в стяжных призмах, величины взаимного сдвига секторов поставного статора и усилия прессования сердечника статора. В этом случае получается сочетание высокой помехоустойчивости ИЭ ВОК между сенсорами и вторичными преобразователями и самых сен-

соров с простотой реализации последних [8]. Разработана схема ГВОИ для систем технической диагностики приведена на рис. 1.



Рис. 1. ГВОИ контрольно-диагностических параметров систем технической диагностики с питанием через общий волоконно-оптический канал: ЧЭ – чувствительный элемент; ПЕК – преобразователь емкость-код; ПКССК – преобразователь код-свет и свет-код (коммуникационная подсистема); ИЭВОК – информационно-энергетический волоконно-оптический канал; Адп – адаптер; П – ВОК питания; Д – ВОК данных; П – призма; КП – пластина для крепления ВОК; СП – система питания; ПНС и ПСН – преобразователь напряжение-свет и свет-напряжение, Др – блок управления работой ПНС; ОМ – оптический мультиплексор; МК – микроконтроллер, СТД – система технической диагностики; БИ – блок отображения диагностической информации

Система, которая показана на рис. 1 работает следующим образом. Первичный измерительный преобразователь неэлектрических физических величин – чувствительный элемент ЧЭ, который преобразует указанную величину в цифровой код типа NRZ. Далее коммуникационная подсистема ПКССК обеспечивает сбор измерительной информации (закодированной в цифровом коде) и ее преобразования в модулированный оптический сигнал.

Этот сигнал затем передается через ОМ по волоконно-оптическому кабелю в зону обработки, где с помощью ОМ и ПКССК (с использованием фотоприемника) преобразуется в электрический сигнал с последующим усилением до необходимого логического уровня цифровых сигналов для МК СТД, где происходит обработка информационных данных.

В случае передачи сигналов с МК СТД к измерительным преобразователям система работает аналогично. При этом для устранения влияния внешних воздействий (электромагнитные поля, температура и т. д.), возникающие в изолированной зоне во время работы энергетического оборудования, средства обработки информационных сигналов с первичных преобразователей отнесены на безопасное расстояние.

Особенностью предложенной схемы является то, что для питания узлов первичного преобразователя, передачи данных от первичного преобразователя и данных управления работой первичного преобразователя используется одна ВОК. Основным элементом ОМ при этом является оптическая призма, в которой за счет дисперсии, т. е. зависимости показателя преломления от длины волны оптического излучения, происходит пространственное разделение (или объединения для обратного направления) оптических волн.

В ГВОИ используются три оптических канала, работающие на следующих длинах оптического излучения: λ_1 (питание), λ_2 (измерительная информация) и λ_3 (данные управления). Торец волоконного световода (ИЭ ВОК), по которому передается оптическое излучение трех каналов, располагается на пластине крепления. С торца ИЭ ВОК оптическое излучение падает на призму. В призме происходит пространственное разделение оптического излучения в зависимости от длины волны и отклонение каждой спектральной составляющей на определенный угол. Пространственные координаты выхода оптических волн определенных спектральных составляющих, можно определить исходя из формул для расчета траекторий лучей в треугольной призме [10].

Предложенная схема построения ГВОИ для систем технической диагностики с емкостными сенсорами может быть использована для решения задач мониторинга состояния электроэнергетического оборудования и создание средств измерения контрольно-диагностических параметров оборудования электростанций для повышения эффективности работы оборудования с возможностью продления срока его эксплуатации

Вывод

Применение ГВОИ с емкостными сенсорами контрольнодиагностических параметров систем технической диагностики оборудования является перспективным направлением повышения надежности и безопасности эксплуатации электроэнергетического оборудования. При необходимости размещения первичных преобразователей на значительном расстоянии от средств обработки (изолированной зоне) их питание может осуществляться с помощью оптической энергии, передаваемой через информационно-энергетический ВОК, реализованный на основе технологий "Wavelength-Division Multiplexing".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Задворнов, С. А. Исследование методов построения гибридных волоконно-оптических измерительных систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 01.04.01. – М. : 2009. – 23 с.

2. Левицький, А. С. Гібридні волоконно-оптичні вимірювачі контрольнодіагностичних параметрів гідрогенераторів / А. С. Левицький, Є. О. Зайцев // Гідроенергетика України. – 2015. – № 3–4. – С. 32–33.

3. Ключников, А. А. Волоконно-оптические информационноизмерительные системы – путь к повышению надежности эксплуатации генераторов АЭС, ТЭС и ГЭС / А. А. Ключников, А. С. Левицкий, Г. М. Федоренко // Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. – 2012. – Вип. 18. – С. 57–65.

4. **Rosolem, J. B.** Optical system for hydrogenerator monitoring / J.B. Rosolem, C. Floridia, J. Sanz // Proc. International Council for Power Electroenergetical Systems CIGRE 2010. – Paris (France) – 2010. – P. 1–8.

5. **Wang, M. R.** Wavelength-division multiplexing and demultiplexing on locally sensitized single-mode polymer microstructure waveguides / M. R. Wang [et. al.] // Optics letters. – 1990 – vol. 15, No. 7 – P. 363–365.

6. **Маліновський, В. І.** Інформаційна мережа з об'єднаними оптичними інтерфейс-каналами: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.05. – Вінниця, 2010. – 20 с.

7. Wavelength Division Multiplexed Optical Interconnect Using Short Pulses / B. E. Nelson [et. al.] // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 9, no. 2, March/April 2003 – C. 486–491/

8. **Левицький, А. С.** Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів / А. С. Левицький, Г. М. Федоренко, О. П. Грубой. – Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2011 – 242 с.

9. Turán, J. Optically powered fiber optic sensors / J. Turán, Ľ.Ovseník, J. Turán // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2005. – No. 3, Vol. 5. – P. 1–7.

10. Ландсберг, Г. С. Преломление в призме : элементарный учебник физики / Г. С. Ландсберг. – 13-е изд. – М. : Физматлит, 2003. – Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – С. 231–232.

E-mail: <u>zaitsev@i.ua</u> <u>lev@ied.org.ua</u> sudorchyk@ipnet.ua

УДК 535.32: 621.378 ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ НАНОСЛОЕВ ОКСИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

И. У. ПРИМАК, А. В. ХОМЧЕНКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 535.32: 621.378 THE WAVEGUIDE THIN-FILM GAS SENSOR *I. U. PRIMAK, A. V. KHOMCHENKO*

Аннотация

Представлены результаты исследования изменения волноводных свойств полупроводниковых пленок при адсорбции молекул газа на их поверхности. Для пленок из двуокиси олова промоделировано изменение оптических потерь в условиях адсорбции газа. Выполнен анализ чувствительности интегрально-оптических датчиков на основе пленок ряда оксидных полупроводников.

Ключевые слова:

волноводная спектроскопия, датчик газовых примесей, адсорбция.

Abstract

Results of studying changes in waveguide properties of semiconductor films in the case of adsorption of gas molecules on their surface are presented. For films of tin dioxide the optical losses variation in conditions of gas adsorption are simulated. The analysis of the sensitivity of integrated optical sensors is presented.

Key words:

waveguide spectroscopy, sensor, gas impurities, adsorption.

Полупроводниковые тонкопленочные структуры широко используются в качестве чувствительных элементов интегрально-оптических датчиков газовых примесей [1]. Принцип действия таких датчиков основан на регистрации изменений постоянной распространения h = h' + ih'' волноводной моды пленки, обусловленных вариациями проводимости полупроводниковой пленки при адсорбции молекул газа на ее свободной поверхности. В данном сообщении проанализировано влияние адсорбции газовых примесей на волноводные свойства нанослоев оксидных полупроводников.

Рассмотрим волноводную полупроводниковую пленку толщиной d, нанесенную на поверхности подложки и находящуюся в атмосфере исследуемого газа. Проанализируем распределение свободных носителей заряда в пленке при адсорбции молекул газа на ее поверхности. Представление о характере такого распределения можно получить, решая уравнение Пуассона, которое в случае полностью ионизированных доноров и акцепторов имеет вид [2, 3]

$$\frac{d^2Y}{d\xi^2} = (\exp(Y) - 1 + q^2[1 - \exp(-Y)])/(1 + q^2), \qquad (1)$$

где $\xi = x/L$, $Y = e(\varphi_v - \varphi)/kT$, $q = \sqrt{c_0^- / c_0^+}$, $L = \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon kT / [e^2 (c_0^+ + c_0^-)]} - эффектив$ $ная длина Дебая; <math>\varphi$ – потенциал; φ_v – потенциал в объеме полупроводника при $d \to \infty$; e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – температура; c_0^- и c_0^+ – соответственно начальные концентрации свободных электронов и дырок в полупроводнике; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – статическая диэлектрическая проницаемость полупроводника.

В случае d/L < 1 (концентрация основных носителей заряда в полупроводнике менее 10^{20} м^{-3}), учитывая условие $|Y - Y_s| << 1$ (Y_s – поверхностный потенциал) из (1) имеем:

$$Y = Y_s - \frac{\operatorname{sh}(\sqrt{a\xi})}{\operatorname{ch}(\sqrt{ad}/L)} \left[\frac{b}{a} \exp(-\sqrt{ad}/L) - \frac{\sigma_d L}{\varepsilon \varepsilon_0 \sqrt{a}} \right] + \frac{b}{a} \left[\exp(\sqrt{a\xi}) - 1 \right] , \qquad (2)$$

где $b = d^2 Y / d\xi^2 \Big|_{\xi=0}$; $a = [\exp(Y_s) + q^2 \exp(-Y_s)] / (1+q^2)$; σ_d – плотность поверхностного заряда на границе $\xi = -d/L$. Здесь использованы граничные условия $Y \Big|_{\xi=0} = Y_s$, $dY / d\xi \Big|_{\xi=-d/L} = \sigma_d L / \varepsilon \varepsilon_0$.

На рис.1, а приведены распределения концентрации $c^{-}(\xi)$ электронов в полупроводниковой пленке *n*-типа ($q \gg 1$), сплошная кривая получена при решении уравнения (1) методом Рунге-Кутта, а штриховая линия – с использованием выражения (2). При этом

$$\Delta c^{-} = c^{-}(\xi) - c_{0}^{-} = c_{0}^{-}(\exp(-Y) - 1).$$
(3)

Указанные зависимости получены при $c_0^- = 3 \cdot 10^{20}$ м⁻³; L = 0,333 мкм (пленка SnO₂ при T = 300 K); d/L = 0,3; $\sigma_d = 0$ (окружающая среда рассматривается как идеальный диэлектрик); $\sigma_s = 3 \cdot 10^{14}$ м⁻² (σ_s – плотность поверхностного заряда на границе раздела пленка-газ), при этом $Y_s = -2,672$.

При d/L > 1 (концентрации основных носителей заряда в полупроводнике порядка 10^{23} м^{-3}) распределение потенциала в пленке описывается выражением [3]

$$Y = 2\rho \ln[\exp(0, 5\rho Y_s) - \sqrt{0, 5}\xi],$$
(4)

где $\rho = 1$ для обогащенного слоя в полупроводнике *n*-типа (обедненного слоя в полупроводнике p-типа); $\rho = -1$ для обогащенного слоя в полупроводнике *p*-типа (обедненного слоя в полупроводнике *n*-типа).



Рис. 1. Профиль концентрации электронов в полупроводниковой пленке

На рис. 1, б представлены результаты расчета распределения концентрации $c^{-}(\xi)$ электронов в полупроводниковой пленки *n*-типа (q>>1). При этом предполагалось, что $c_0^- = 4 \cdot 10^{23}$ м⁻³; $L = 9, 3 \cdot 10^{-3}$ мкм (это параметры пленки SnO₂ легированной Sb при T = 300 K); d/L = 10.8. При численном уравнения (1)с граничными $Y|_{\mathcal{E}=0}=Y_{\mathcal{S}}$, решении условиями $dY/d\xi|_{\xi=-d/L} = Y|_{\xi=-d/L} = 0$ и плотностью поверхностного заряда $\sigma_s = 3 \cdot 10^{16}$ м⁻² величина $Y_s = -3,614$. Расчеты осуществлялись с использованием метода Рунге-Кутта (сплошная линия на рис. 1) и выражения (4) (штриховая линия).

Приращение $\Delta \varepsilon_2 = \Delta \varepsilon'_2 + i \Delta \varepsilon''_2$ диэлектрической проницаемости полупроводниковой пленки, обусловленное изменением концентрации $\Delta c^{-}(\Delta c^{+})$ свободных электронов (дырок) определяется выражениями [4]

$$\Delta \varepsilon_2' = -\frac{\Delta c^{\pm} e^2}{m_{\pm}^* \varepsilon_0 \omega^2}, \quad \Delta \varepsilon_2'' = \frac{\Delta c^{\pm} e^3}{(m_{\pm}^*)^2 \varepsilon_0 \omega^3 \mu^{\pm}}, \tag{5}$$

где m_{-}^{*} и μ^{-} (m_{+}^{*} и μ^{+}) – эффективная масса и подвижность электрона (дырки); ω – частота.

Пусть $\varepsilon_2^{(0)} = \varepsilon_2'^{(0)} + i\varepsilon_2''^{(0)}$ – диэлектрическая проницаемость пленки до адсорбции. Если величина $\varepsilon_2''^{(0)}$ полностью определяется концентрацией свободных электронов (это справедливо для SnO₂ или ZnO), то справедливы отношения

$$\Delta \varepsilon_{2}^{"} / \varepsilon_{2}^{"(0)} = \Delta c^{-} / c_{0}^{-}, \ \Delta \varepsilon_{2}^{'} / \varepsilon_{2}^{"(0)} = \Delta c^{-} m_{-}^{*} \mu^{-} \omega / (c_{0}^{-} e).$$
(6)

Это означает, что профиль диэлектрической проницаемости в пленке при адсорбции подобен распределению свободного заряда в ней (рис. 1). При этом, согласно теории возмущений комплексная постоянная распространения волноводной моды испытывает приращение $\Delta h = \Delta h' + i\Delta h''$, определяемое выражением

$$\frac{\Delta h}{h_0''} = \frac{\int\limits_{-d}^0 \Delta \varepsilon_2(x) \left(h_0^2 \Psi^2 + P(\nabla \Psi)^2\right) dx}{\varepsilon_2''^{(0)} \int\limits_{-d}^0 \left(h_0^2 \Psi^2 + P(\nabla \Psi)^2\right)},$$
(7)

где P=0 и P=1 для мод *TE* и *TM* поляризаций соответственно; Ψ – распределение поля волноводной моды в пленке; $h''_0 = \text{Im} h_0$ (h_0 – постоянная распространения до адсорбции газа).

Оценим величину приращений Δh для представленных на рис. 1 распределений, используя выражения (6, 7). Для волноводной структуры с параметрами d/L = 0,3; L = 0,33 мкм; $\varepsilon_2^{(0)} = 3,64086 - i3,17 \cdot 10^{-7}$; $\varepsilon_1 = 1$; $\varepsilon_3 = 2,17976$, (здесь ε_1 и ε_3 – диэлектрические проницаемости среды и подложки соответственно) комплексная постоянная распространения основной моды TE поляризации равна $h_0/k_0 = 1,530070 - i4,067 \cdot 10^{-8}$, где $k_0 = 2\pi/\lambda$; $\lambda = 0,6328$ мкм.

Возникновение поверхностного заряда $\sigma_s = 3 \cdot 10^{14}$ м⁻² и изменение концентрации свободных электронов в этой пленке (см. рис. 1, *a*) приводит к приращению $\Delta h'' / h_0'' = 9,77$ ($\Delta \varepsilon_2' / \Delta \varepsilon_2'' = 0,2$). В тоже время для пленки с параметрами $\varepsilon_2^{(0)} = 3,64086 - i \cdot 4,23 \cdot 10^{-3}$; $h_0/k_0 = 1,53007 - i \cdot 5,427 \cdot 10^{-4}$; $L = 9,3 \cdot 10^{-3}$ мкм; d/L = 10,8 возникновение заряда с поверхностной плотностью $\sigma_s = 3 \cdot 10^{16}$ м⁻² и изменение концентрации свободных электронов в пленке (см. рис. 1, δ) приведет к относительному приращению $\Delta h'' / h_0'' = 0,446$ ($\Delta \varepsilon_2' / \Delta \varepsilon_2'' = 2$). Отметим, что это значение хорошо согласуется с результатами измерений $\Delta h''$ для полупроводникового интегральнооптического датчика [1] и данными измерений для датчика ацетона на основе тонкопленочной структуры ZnO: WO₃ (рис. 2).



Рис. 2. Изменение параметров пленки тонкопленочной структуры ZnO: WO₃ в присутствии в воздухе паров ацетона при различной интенсивности зондирующего света $I_1=I$, $I_2=5I$, $I_3=9I$

Представленные результаты свидетельствуют о том, что, с уменьшением отношения толщины полупроводниковой пленки к эффективной длине Дебая d/L, чувствительность датчика, пропорциональная величине $\Delta h''/h''_0$, возрастает, о чем свидетельствуют результаты экспериментов для полупроводникового интегрально-оптического датчика концентрации примеси аммиака в воздухе (рис. 3).



Рис. 3. Изменение чувствительности датчика при увеличении степени легирования полупроводниковой пленки донорной примесью: соотношение SnO₂:Sb₂O₅ в распыляемой мишени (9:1) – кривая 1; (6:1) – кривая 2; (4:1) – кривая 3

В заключении отметим, что снижение концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковой пленке позволяет существенно повысить отношение $\Delta h'' / h''_0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khomchenko, A V. Waveguide spectroscopy of thin films / A. V. Khomchenko // New York. Academic Press. – 2005.

2. Волькенштейн, Ф. Ф. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбцию / Ф. Ф. Волькенштейн. – М. : Наука, 1987. – 432 с.

3. **Моррисон, С.** Химическая физика поверхности твердого тела / С. Моррисон. – М. : Мир, 1980. – 488с.

4. **Ханспенджер, Р.** Интегральная оптика. Теория и технология / Р. Ханспенджер. – М. : Мир, 1985. – 384с.

E-mail: avkh@mogilev.by

УДК 62-83 КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

В. А. СЕЛИВАНОВ, Н. Г. ШЕЛЕСТЕНКО, А. М. КОКАШИНСКИЙ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 62-83

CONTROL AND MANAGEMENT OF CLIMATE PARAMETERS OF VENTILATION UNIT BASED ON FUZZY LOGIC V. A. SELIVANOV, N. G. SHELESTENKO, A. M. KOKASHINSKY

Аннотация

В статье рассмотрена система контроля и управления приточно-вытяжной вентиляционной установки с системой активной утилизацией тепла, работающей в различных режимах: охлаждение или подогрев, вентиляция или кондиционирование. Режимы работы обеспечиваются на основе нечеткой логики тиристорным регулятором напряжения.

Ключевые слова:

контроль, система, управление, установка, модель, регулирование, тепло, температура, фаззификация, сигналы.

Abstract

The article considers the system for monitoring and controlling the supply and exhaust ventilation plant with an active heat recovery system operating in various modes: cooling or heating, ventilation or air conditioning. Modes of operation are provided on the basis of fuzzy logic by a thyristor voltage regulator.

Key words:

control, system, control, installation, model, regulation, heat, temperature, fuzzification, signals.

Система контроля, с точки зрения происходящих в ней процессов теплообмена и математического описания, является наиболее сложной [1, 2]. Следовательно, полученные для нее выводы могут быть распространены и на более простые системы: без рекуператоров или с пассивными рекуператорами. Схема подобной установки приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема системы приточно-вытяжной вентиляционной установки с системой активной утилизации тепла

На схеме приведена теоретическая модель здания, состоящая из двух помещений, параметры микроклимата в которых поддерживаются системой с водяным кольцевым контуром и параллельно подключенным к нему теплонасосными установками, располагающимися в каждом из помещений.

Помещения по своей архитектуре одинаковы, приточный воздух подается в количестве L м³/ч.

В состав системы кондиционирования входят: тепловой насос «водавоздух», первичный контур (воздух-хладагент), вторичный контур T_{пр}-T_{обр} (фреон-вода). Приточный воздух забирается снаружи. В калорифере центральной вентиляционной установки воздух нагревается до температуры t<t_{вн}. В помещение воздух попадает с температурой t, смешивается с воздухом, который находится в помещении.

В одном из помещений присутствуют теплоизбытки (Q_{изб}), в другом помещении – теплопотери (Q_{потери}).

Для поддержания заданной температуры в помещении при необходимой производительности вентиляционной установки рассмотрим модель, решающую следующие задачи (рис. 2):

 поддержание температуры в помещении на заданном уровне путем регулирования мощности нагревателя/охладителя в канале приточной вентиляции и внутренней системы отопления; управление скоростями приточного и вытяжного вентиляторов так, чтобы обеспечить достаточный воздухообмен и ограничивать температуру приточного воздуха в комфортных пределах.



Рис. 2. Модель системы управления с нечеткими регуляторами

Система управления построена по принципу подчиненного регулирования координат с двумя нечеткими регуляторами FLC T_{in} и FLC T_{ch} с идентичными входными сигналами и базой правил. Все системы с нечеткой логикой функционируют по одному принципу: показания измерительных приборов фаззифицируются (переводятся в нечеткий формат), обрабатываются, дефаззифицируются и в виде привычных сигналов подаются на исполнительные устройства. Использованы по два входных сигнала - отклонение температуры от заданного значения и ее производная. Дискретное значение отклонения температуры в помещении от заданной $T^*_{in set} - T^*_{in}$ подается через усилитель и блок ограничения, определяющие допустимый диапазон отклонения температуры от заданной ($\pm 1...3$ °C). Разность $T^*_{ch set}$ - T^{*}_{ch} нормируется так, чтобы температура приточного воздуха изменялась в пределах +15...+75 °С. Дискретные разности первого порядка T^*_{chi} - $T^*_{ch(i-1)}$, *T*^{*}_{*ini*-*T*}^{*}_{*ini*-*i*), соответствующие производным температуры воздуха в поме-} щении dT_{in}/dt и в приточном канале dT_{ch}/dt , получены с использованием блоков задержки на один такт Unit Delay. Контроль температуры приточного T^*_{ch} необходим для обеспечения комфортных условий и защиты от перегрева и переохлаждения. Выходные сигналы нечетких регуляторов подаются на интеграторы с регулируемыми коэффициентами в диапазоне 0,05...1, что обеспечивает отсутствие ошибки в установившихся режимах и возможность адаптации системы к объектам с различными постоянными времени.

Selector HV, в свою очередь, в зависимости от уровня выходного сигнала интегратора одновременно управляет мощностью нагревателя/охладителя P^* и уменьшает скорость вентиляторов υ^* , если номинальной мощности нагревателя недостаточно для изменения температуры подаваемого потока воздуха. Сигнал управления нагревателем/охладителем в приточном канале одновременно может подаваться на систему отопления/кондиционирования внутри помещения.

Фаззификация входных переменных и выходного сигнала осуществляется пятью S-, Z- и П-функциями принадлежности типа gaussmf1 с равномерным распределением на нормированных диапазонах изменения переменных [-1;+1]. Отрицательным значениям mf1, mf2 соответствуют лингвистические понятия «холодно», «остывает», «уменьшается», положительным mf4, mf5 – «жарко», «нагревается», «увеличивается», функция принадлежности mf3 соответствует установившемуся процессу.

На рис. З показаны графики изменения температуры в помещении T_{in} до заданной +20 °C при некоторых номинальных параметрах объекта с вентиляционной установкой с активной рекуперацией тепла в режиме нагрева [2]. В этом режиме температура приточного воздуха $T_{ch} = T_{cond}$, а удаляемого вытяжным каналом – $T_{out} = T_{evap}$.



Рис. 3. Графики переходных процессов при номинальных параметрах объекта управления

Синтезированная система управления с FUZZY LOGIC за счет согласованного управления вентиляторами и нагревателями обеспечивает наиболее быстрое достижение заданной температуры при запуске системы. На рис. 4 показаны аналогичные переходные процессы при отклонении параметров объекта управления от расчетных – эквивалентный коэффициент усиления объекта и постоянные времени увеличены в два раза. Очевидно, что принципиальных изменений не возникает – температура в помещении поддерживается на заданном уровне с погрешностью не более ±1 °C.



Рис. 4. Графики переходных процессов при измененных параметрах объекта управления

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный блок нечетких регуляторов в качестве ядра систем управления климатическими установками. Системы с нечеткой логикой обладают удовлетворительной точностью и при заранее записанной базе правил и определенных функциях принадлежности требуют минимальных затрат времени при настройке и сохраняют работоспособность в широком диапазоне изменений параметров объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянова, О. В. Климатические системы с тепловыми насосами и водяным контуром / О. В. Аверьянова // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 2. – С. 19–22.

2. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха : учеб. пособие / Е. С. Бондарь [и др.]. – Киев : Аванпост-Прим, 2005. – 560 с.

УДК 621. 793

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА И УСАДКИ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

И. А. СОСНОВСКИЙ, М. А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, *К. Е. БЕЛЯВИН, А. А. КУРИЛЕНОК, **О. О. КУЗНЕЧИК

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» *Белорусский национальный технический университет **ГНУ «Институт порошковой металлургии» Минск, Беларусь

UDC 621. 793

METHODS AND MEANS OF TEMPERATURE CONTROL OF HEATING AND SHRINKAGE OF THE POWDER LAYER IN THE PROCESS OF CENTRIFUGAL INDUCTION WELDING I. A. SOSNOVSKY, M. A. BELOTSERKOVSKY, K. E. BELYAVIN, A. A. KURILYONOK, O. O. KUZNECHIK

Аннотация

Разработан метод контроля и регулирования температуры нагрева для процесса центробежной индукционной наплавки покрытий с использованием пирометрического контроля температуры наружной поверхности заготовки и регулирования мощности нагрева. Разработан метод непрерывного контроля за уплотнением порошкового слоя, связанный с изменением его момента инерции вследствие усадки.

Ключевые слова:

центробежная индукционная наплавка, контроль и регулирование температуры нагрева, контроль усадки порошкового слоя, средства контроля.

Abstract

Developed a method for the control and regulation of heating temperature for the process of centrifugal induction welding surfaces with the use of pyrometric temperature control of the outer surface of the workpiece and the regulation of heat output. The developed method of continuous control of compaction of the powder layer associated with the change of its moment of inertia due to shrinkage.

Key words:

centrifugal induction welding, control and regulation of heating temperature, control the shrinkage of the powder layer, means of control.

Одним из наиболее эффективных методов нанесения порошковых покрытий является метод центробежной индукционной наплавки покрытий [1–2]. Индукционным центробежным методом в настоящее время можно наносить покрытия на внутренние, наружные и торцевые поверхности. Автоматизация процесса центробежной индукционной наплавки покрытий на внутренние поверхности цилиндрических заготовок предусматривает использование автоматического регулирования и стабилизации режимов нагрева заготовок. Стабилизация режимов нагрева необходима в первую очередь для обеспечения стабильности повторяемости качества каждой из большого числа упрочняемых деталей. Использование автоматического регулирования процесса центробежной наплавки позволяет, с одной стороны, осуществлять стабилизацию строго заданных режимов нагрева, а с другой, практически полностью исключить трудозатраты, связанные с необходимостью ручного регулирования этих режимов в течение каждого цикла нанесения покрытия.

В качестве основных технических средств для автоматизации процесса центробежной наплавки использованы серийно выпускаемые Каменец-Подольским приборостроительным заводом (Украина) прибор контроля измеряемой в процессе нагрева заготовок температуры (оптический пирометр излучения АПИР-С), а также нестандартная аппаратура (регулятор мощности генератора ТВЧ АРРИН-2М) для регулирования и стабилизации задаваемой температуры и схемы привязки к источнику нагрева и стыковки представленных выше приборов, разработанные Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси.

Постановка задачи

Разработка метода и средств регулирования и стабилизации режимов нагрева, на базе описанных выше измерительных и регулирующих приборов, связана с необходимостью в процессе нанесения покрытия осуществлять непрерывный контроль и поддержание температуры нагрева заготовки на заданном уровне. Повышенные требования к точности задания температуры наплавки и стабилизации ее на заданном уровне обусловлены тем, что применяемые для упрочнения деталей износостойкие хромоникелевые сплавы типа ПГ-СР2; ПГ-СР3; ПГ-СР4 или на основе железа – ПР-Х4Г2Р4С2Ф очень чувствительные к перегреву, который существенно ухудшает их свойства после формирования из них покрытия.

Кроме того ставилась задача разработки метода, обеспечивающего непрерывный контроль процесса уплотнения (усадки) порошкового слоя, для повышения качества получаемых биметаллических изделий и увеличения производительности процесса центробежной индукционной наплавки.

Система автоматического регулирования режимов нагрева позволяет при заданных температурно-временных параметрах обеспечить стабилизацию процесса центробежной индукционной наплавки для широкого диапазона типоразмеров упрочняемых деталей.

На рис. 1 представлена структурная схема системы автоматического регулирования режима нагрева заготовок [3].



Рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования режима нагрева заготовок: ПЧД и ПВВ-3 – соответственно, первичный оптический преобразователь частичного излучения и преобразователь измерительный вторичный, которые образуют комплекс АПИР-С; БС – блок согласования выходного сигнала вторичного преобразователя ПВВ-3 АПИР-С с входным сигналом АР-РИН-2М; АРРИН-2М – регулятор мощности генератора ТВЧ; РУ – реле уровня выходного сигнала вторичного преобразователя АПИР-С; РВ – реле времени; ГТВЧ – генератор токов высокой частоты; И – индуктор

Работа системы автоматического регулирования заключается в следующем. Нагрев упрочняемой заготовки производится после подачи от регулятора мощности АРРИН-2М на сетки тиратронов ГТВЧ управляющего напряжения, что вызывает протекание через индуктор И токов высокой частоты. Протекание тока в индукторе создает индуцирование его в заготовке и ее разогрев. В результате нагрева происходит изменение спектра волн светового излучения наружной поверхности заготовки, которое улавливается оптическим датчиком частичного излучения ПЧД, преобразующего интегральный световой поток в электрический сигнал. Электрический сигнал, соответствующий температуре нагретой заготовки, усиливается и линеаризуется вторичным измерительным преобразователем ПВВ-3, с выхода которого снимают напряжение от 0 до 10 В, пропорциональное изменению температуры от 600 до 1300 °С. Выходное напряжение ПВВ-3 подается на вход АРРИН-2М через блок согласования БС.

Блок согласования БС представляет собой преобразователь выходного напряжения ПВВ-3 в изменяемое по линейному закону электрическое сопротивление, регулирующее входной ток АРРИН-2М пропорционально изменению измеряемой температуры. Поступающий на вход АРРИН-2М через БС электрический сигнал усиливается и управляет работой выходного тиристорного ключа АРРИН-2М, регулирующего уровень управляющего напряжения тиратронов ГТВЧ.

Принцип регулирования подаваемой на нагреваемую заготовку мощности заключается в том, что при повышении температуры в диапазоне 600...1300 °C выходное напряжение регулятора АРРИН-2М, а следовательно, и подводимая к индуктору ГТВЧ мощность снижается.

Продолжительность изотермической выдержки устанавливается с помощью реле времени PB, управляемого реле уровня РУ выходного сигнала ПВВ-3 АПИР-С.

Метод контроля усадки нанесения покрытия для процесса центробежной индукционной наплавки включает в состав технологической схемы (рис. 2) измеритель электрической мощности, связанный с блоком отключения источника нагрева детали [4].

Реализация метода происходит следующим образом. В процессе формования слоя металлического порошка 1 к внутренней поверхности цилиндрической детали 2 моменты инерции составных частей системы вращения не изменяются, за исключением момента инерции порошкового слоя, который уплотняется под воздействием индукционного нагрева и центробежных сил. С учетом этого момент инерции порошкового слоя определяется выражением:

$$J = \frac{m(r_1^2 + r_2^2)}{2},$$
 (1)

где m – масса порошкового слоя; r_1 – внутренний радиус порошкового слоя; r_2 –радиус внутренней поверхности заготовки.



Рис. 2. Технологическая схема контроля усадки порошкового слоя в процессе его центробежного формования Следовательно, изменение момента инерции порошкового слоя вследствие его усадки:

$$\Delta J = \frac{m(r_{11}^2 + r_{10}^2)}{2} \quad , \tag{2}$$

где r_{10} – начальный радиус внутренней поверхности порошкового слоя; r_{11} – радиус порошкового слоя после усадки.

Из (2) легко получить зависимость текущего радиуса порошкового слоя r_{11} от изменения его момента инерции:

$$r_{11}^2 = r_{10}^2 + \frac{m}{2}\Delta J \,. \tag{3}$$

Увеличение момента инерции порошкового слоя происходит в результате уплотнения порошка и увеличения внутреннего радиуса порошкового слоя r_1 . Это, в свою очередь, приводит к увеличению нагрузки на привод вращения 3 и потребляемой им электрической мощности, определяемой по формуле

$$P = IU = \eta \omega M = J\omega^3, \qquad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения детали; *I* – сила тока; *U* – напряжение; η – к.п.д.; *M* – крутящий момент.

Процесс уплотнения порошка контролируется путем измерения этой мощности с помощью ваттметра 4, подключенного к источнику питания 5. Используя закон сохранения массы, получим соотношение, связывающее текущую среднюю пористость Π порошкового слоя с его текущим радиусом r_{11} в виде:

$$(1 - \Pi)(r_2^2 - r_{11}^2) = (1 - \Pi_0)(r_2^2 - r_{10}^2),$$
(5)

или

$$\Pi = 1 - (1 - \Pi_0) \frac{r_2^2 - r_{10}^2}{r_2^2 - r_{11}^2},$$
(6)

где *П*₀ – начальная пористость порошкового слоя.

Таким образом, зная изменение момента инерции порошкового слоя ΔJ в процессе центробежной индукционной наплавки, можно определить изменение его внутреннего радиуса по формуле (3), а, воспользовавшись после этого формулой (6), можно определить среднюю пористость порошкового слоя. По достижению требуемой плотности порошкового слоя и его толщины, определяемой уровнем срабатывания блока отключения 6 источника нагрева 7, происходит его срабатывание, что соответствует завершению процесса нанесения покрытия. Далее отключают привод вращения,

полученную деталь извлекают из центров 8 зажимного приспособления, снимают крышки 9 и охлаждают.

Выводы

1. В результате анализа технологических особенностей процесса центробежной индукционной наплавки покрытий, на внутренние поверхности полых цилиндрических заготовок при нагреве наружным индуктором тока высокой частоты показано, что наиболее рациональным является поддержание заданной температуры наплавки порошка путем пирометрического контроля температуры наружной поверхности заготовки и регулирования мощности нагрева. Разработана система контроля и регулирования температуры при центробежной индукционной наплавке.

2. Разработан метод, позволяющий осуществлять непрерывный контроль усадки порошкового покрытия в процессе центробежной индукционной наплавки покрытий. Использование метода контроля усадки позволяет обеспечить повышение качества получаемых биметаллических изделий и производительности процесса, а также снижение припуска на механическую обработку покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосновский, И. А. Технология индукционного нагрева в процессах центробежного нанесения покрытий : в 2-х т. / И. А. Сосновский, К. Е. Белявин, А. Л. Худолей // Перспективные материалы и технологии / Под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : Витеб. гос. техн. ун-т, 2015. – Т. 1., гл. 17. – С. 300–313.

2. Белоцерковский, М. А. Получение наноразмерных компонентов в антифрикционном покрытии при индукционной центробежной наплавке порошковых шихт на основе медных сплавов / М. А. Белоцерковский, А. А. Курилёнок, И. А. Сосновский // Инновационные технологии в машиностроении / под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2015. – С. 23–25.

3. Пат. 8558 Респ. Беларусь, МПК В 22 F 7/04. Устройство для нанесения покрытий из металлических порошков на внутренние поверхности деталей / И.А. Сосновский [и др.]; заявитель ОИМ НАНБ. – № и 20120198; заявл. 27.02.12; опубл. 30.10.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5. – С. 192.

4. Метод контроля усадки порошкового слоя в процессе центробежного индукционного нанесения покрытий / К. Е. Белявин [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении / под общ. ред. Е. А. Памфилова. – Брянск : БГИТА, 2014. – Вып. 19. – С. 23–26.
УДК 534.86

РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПАРАБОЛОИДНЫХ И ЭЛЛИПСОИДНЫХ ПЬЕЗОПЛАСТИН

В. И. БОРИСОВ, С. С. СЕРГЕЕВ, Е. Н. ПРОКОПЕНКО, В. А. НОВИКОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 534.86

THE CALCULATION OF THE ACOUSTIC FIELD OF RADIATION THE ACTIVE CONCENTRATORS ON THE BASIS OF THE PARABOLOIDICAL AND ELLIPSOIDICAL PIEZOELECTRIC CRYSTAL PLATES V. I. BORISOV, S. S. SERGEEV, E. N. PROKOPENKO, V. A. NOVIKOV

Аннотация

Представлены результаты расчета акустических полей излучения круглых фокусирующих акустических преобразователей в виде участка гиперболоида и эллипсоида вращения. Показано, что в дальней зоне как на оси пьезопластины, так и вне оси поле носит неоднородный характер и практически не отличается для обоих типов преобразователей. При увеличении диаметра пьезопластины фокусное расстояние пьезопреобразователя увеличивается.

Ключевые слова:

акустическое поле, пьезоэлектрический преобразователь, пьезопластина, гиперболоид вращения, эллипсоид вращения, ближняя зона, дальняя зона, фокусирующий пьезопреобразователь, фокусное расстояние, диаметр пучка, активный концентратор.

Abstract

By method of the numerical analysis is calculated acoustic field of the radiation round focusing acoustic converters in the manner of area giperboloid and ellipsoid of the rotation. It is shown that in far-field both on axis piezoelectric crystal plates, and outside of axis field carries the lumpy nature and practically does not differ for both types of the converters. When increase the diameter piezoelectric crystal plates focal length piezoelectric converter it increases.

Key words:

acoustic field, piezoelectric converter, piezoelectric crystal plates, giperboloid of the rotations, ellipsoid of the rotation, near zone, far-field zone, focusing piezoelectric converter, focal length, diameter of the bunch, active concentrator.

Фокусирующие пьезопреобразователи (ПЭП) применяются для повышения чувствительности и разрешающей способности неразрушающего акустического контроля. Так как акустическое поле ПЭП формируется в результате интерференции когерентных акустических волн, то кроме основных максимумов, оно содержит ряд дополнительных максимумов, которые могут влиять на эффективность работы ПЭП.

Аналитическое решение при расчете акустического поля фокусирующих ПЭП удается получить лишь для точек, расположенных на акустической оси пьезопластины в виде участка сферической поверхности (активного концентратора) [1, 2]. В работах [3–5] численным методом проведен анализ особенностей акустического поля излучения прямоугольных, круглых плоских и сферических пьезопластин.

В данной работе приведены результаты анализа акустического поля излучения активных концентраторов на основе пьезопластин в виде гиперболоида вращения и эллипсоида вращения для непрерывного режима возбуждения акустических волн. Расчет акустического поля проводился способом, изложенным в [3].

Пьезопластина в виде участка гиперболоида вращения образуется вращением вокруг оси *z* гиперболы, каноническое уравнение которой имеет вид

$$\frac{(z+a)^2}{a^2} = \frac{x^2}{b^2} + 1,$$
 (1)

где *а*, *b* – параметры гиперболы, определяющие ее кривизну.

Пьезопластина в виде участка эллипсоида вращения образуется вращением эллипса вокруг оси *z*, каноническое уравнение которого имеет вид:

$$\frac{(z-a)^2}{a^2} = -\frac{x^2}{b^2} + 1,$$
(2)

где *а*, *b* – параметры эллипса, определяющие его кривизну.

Схема расчета акустического поля излучения для обоих видов рассматриваемых пьезопластин одинакова.

В соответствии со схемой численного расчета для сферических пьезопластин, приведенной в работе [5], величина акустического давления в точке, отстоящей на расстоянии R от элементарной излучающей площадки пьезопластины dS, будет пропорциональна сумме:

$$P = \sqrt{\left(\sum_{0}^{N} \frac{h^{2} \sin \theta}{R} \cos \varphi \cos \frac{2\pi}{\lambda} R\right)^{2} + \left(\sum_{0}^{N} \frac{h^{2} \sin \theta}{R} \cos \varphi \sin \frac{2\pi}{\lambda} R\right)^{2}}, \quad (3)$$

где h – расстояние от вершины гиперболоида и эллипсоида до площадки dS; θ – угол между осью z и направлением на площадку dS.

Коэффициент соs φ учитывает наклон элементарной площадки к направлению на рассматриваемую точку [2].



Рис. 1. Зависимости акустического давления вдоль оси круглой пьезопластины активного гиперболоидного (сплошная линия) и эллипсоидного (пунктирная линия) концентраторов диаметром 10 мм

На рис. 1 приведены результаты расчета изменения величины акустического давления *P* вдоль оси круглой пьезопластины от расстояния *Z* до пьезопластины. На этом рисунке и на вставках к рисунку сплошными линиями приведены результаты расчета для гиперболоидного концентратора, а пунктирными – для эллипсоидного.

Параметры *а* и *b* гиперболы и эллипса выбирались такими, чтобы при диаметре пьезопластин 10 мм стрелка прогиба составляла 0,5 мм.

На вставке рис. 1 (слева) приведено распределение акустического давления в плоскости, перпендикулярной оси пьезопластины в области фокуса, который расположен для гиперболоидного концентратора на расстоянии 47 мм от вершины гиперболоида, а на правой вставке рис. 1 – в плоскости на расстоянии 200 мм. Расчеты приведены для непрерывного режима работы пьезопреобразователей на частоте 5 МГц, нагруженных на воду. Видно, что для обоих концентраторов наблюдается ближняя и дальняя зоны. При этом, фокусное расстояние для обоих концентраторов примерно одинаковое, а распределение давления в плоскостях, перпендикулярных оси пьезопластин как в фокальной области, так и в дальней зоне, носит одинаковый характер с небольшой разницей по амплитуде давления. Диаметр акустического пучка по уровню половинной амплитуды составляет 1,8 мм в области фокуса и 6,6 мм на расстоянии 200 мм от пьезопластины.

Аналогичные результаты расчета акустического давления для активных концентраторов с теми же параметрами параболы и эллипса, но для пьезопластин диаметром 15 мм приведены на рис. 2.



Рис. 2. Зависимости акустического давления вдоль оси круглой пьезопластины активного гиперболоидного (сплошная линия) и эллипсоидного (пунктирная линия) концентраторов диаметром 15 мм

На вставке рис. 2 (слева) приведено распределение акустического давления в плоскости, перпендикулярной оси пьезопластины в области фокуса, который расположен для гиперболоидного концентратора на расстоянии 89 мм от вершины гиперболоида, а на правой вставке рис. 2 – в плоскости на расстоянии 200 мм.

Из рис. 2 видно, что характер изменения акустического давления для обоих типов пьезопластин носит аналогичный характер как и для пьезопластин диаметром 10 мм. Диаметр акустического пучка по уровню половинной амплитуды составляет 2,3 мм в области фокуса и 4,9 мм на расстоянии 200 мм от пьезопластины.

Четкое отличие наблюдается только в том, что при увеличении диаметра пьезопластины фокусное расстояние пьезопреобразователя увеличивается. Так для круглого гиперболоидного пьезопреобразователя с диаметром пьезопластины 22,5 мм фокусное расстояние уже равно 160 мм.

Таким образом, проведенный анализ акустического поля излучения фокусирующих гиперболоидных и эллипсоидных пьезоэлектрических преобразователей показало, что в дальней зоне пространственное распределение поля практически одинаковое для обоих типов преобразователей, и некоторое отличие наблюдается только в ближней зоне на небольшом расстоянии от поверхности пьезопластины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гурвич, А. К.** Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина. – Киев : Техніка, 1980. – 101 с.

2. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Акустические методы контроля :

практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.

3. **Борисов, В. И.** Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2 (43). – С. 105–113.

4. **Борисов, И. И.** Тонкая структура акустического поля излучения пьезопреобразователей на основе круглых пьезопластин / И. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3 (48). – С. 102–108.

5. Структура акустического поля излучения фокусирующих пьезопреобразователей / В. И. Борисов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1 (54). – С. 119–127.

УДК 534.86 СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРАБОЛОИДНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В. И. БОРИСОВ, С. С. СЕРГЕЕВ, А. П. МАГИЛИНСКИЙ, Е. Н. ПРОКОПЕНКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 534.86

THE STRUCTURE OF THE ACOUSTIC FIELD OF THE RADIATION PARABOLICAL FOCUSING PIEZOELECTRIC TRANDUCER V. I. BORISOV, S. S. SERGEEV, A. P. MAGILINSKY, E. N. PROKOPENKO

Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения фокусирующих акустических преобразователей на основе параболоидных пьезопластин. Показано, что в дальней зоне на оси пьезопластины акустическое давление имеет меньшее значение, чем во внеосевой области.

Ключевые слова:

акустическое поле, пьезоэлектрический преобразователь, пьезопластина, параболоид вращения, ближняя зона, дальняя зона, фокусирующий пьезопреобразователь, фокусное расстояние, диаметр пучка, активный концентратор.

Abstract

By method of the numerical analysis is calculated acoustic field of the radiation focusing acoustic converters on base parabolalical piezoelectric crystal plates. It is shown that in far zone on axis piezoelectric crystal plates acoustic pressure is less than on outside of axis.

Key words:

acoustic field, piezoelectric tranducer, piezoelectric crystal plates, paraboloid of rotation, near zone, far-field zone, focusing piezoelectric tranducer, focal length, acoustic bunch, active concentrator.

Аналитическое решение при расчете акустического поля фокусирующих ПЭП удается получить лишь для точек, расположенных на акустической оси пьезопластины в виде участка сферической поверхности (активного концентратора) [1]. В предлагаемой работе приведены результаты анализа акустического поля излучения пьезопластин в виде параболоида вращения для непрерывного возбуждения акустических волн.

Расчетная схема ПЭП в виде круглой пластины в виде параболоида вращения площадью *S* приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема для расчета акустического поля параболоидного ПЭП

Уравнение параболоида имеет вид

$$2qz = x^2 + y^2, \tag{1}$$

где q – параметр параболы, определяющий ее кривизну; \bar{R}_0 – вектор, начало которого совпадает с центром элементарной площадки dS, а конец – с осью пьезопластины.

Результирующая величина давления в точке *A* с координатами *X*,*Y*,*z* будет пропорциональна следующему интегралу

$$P(X,Y,z) = \int_{S} \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left(\cos(\omega t - kR) \right) dS = \int_{S} \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left(\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}R\right) \right) dS.$$
(2)

В этом выражении R – расстояние от точечного излучателя площадью *dS*, расположенного в точке с координатами *x*, *y*, *z*₀ до точки *A*; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – модуль волнового вектора (волновое число); λ – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна.

В выражении (2) считаем, что от элементарного излучателя площадью *dS* излучается сферическая акустическая волна, это соответствует физической действительности, если размер площадки значительно меньше расстояния от площадки до рассматриваемой точки. Коэффициент $\cos\varphi$, учитывает наклон элементарной площадки к направлению на рассматриваемую точку [1]. В соответствии с рис. 1, векторы \vec{R}_0 и \vec{R} в декартовой системе координат выражаются следующим образом:

$$\vec{R}_0 = -x\vec{i} + -y\vec{j} + q\vec{k} ; \qquad (3)$$

$$\overline{R} = (X - x)\overline{i} + (Y - y)\overline{j} + \left(z - \frac{x^2 + y^2}{2q}\right)\overline{k}.$$
(4)

Расчет интеграла (1) будем проводить путем численного интегрирования, проводя замену интеграла суммой по методике, изложенной в работе [2–4]. После разделения временных и пространственных координат, в соответствии с работой [4], для искомой суммы получается выражение

$$P(X,Y,z) = P_0 \Delta \theta \Delta \alpha \sqrt{\left(\sum_{0}^{N} \frac{OD^2 \sin \theta}{R} \cos \varphi \cos \frac{2\pi}{\lambda} R\right)^2 + \left(\sum_{0}^{N} \frac{OD^2 \sin \theta}{R} \cos \varphi \sin \frac{2\pi}{\lambda} R\right)^2}, (5)$$

которое пропорционально величине акустического давления в точке А.

$$\sin \theta = \frac{CD}{OD} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + \left(\frac{x^2 + y^2}{2q}\right)^2}}.$$
 (6)

Полученное выражение (5) позволяет определить амплитуду давления *P* (в произвольных единицах) акустической волны, генерируемой пьезопластиной в любой точке полупространства.

На рис. 2 приведено распределение давления P на разном расстоянии от вершины параболоида на оси параболической пьезопластины диаметром 12 мм и параметром параболы q=12,5 мм, что соответствует стреле прогиба 1,44 мм; на рис. 3 – диаметром 24 мм и q=12,5 мм, что соответствует стреле прогиба 5,76 мм; на рис. 4 – диаметром 12 мм и q=25 мм, что соответствует стреле прогиба 0,72 мм; а на рис. 5 – диаметром 24 мм и параметром параболы 25, мм что соответствует стреле прогиба 2,88 мм.



Рис. 2. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 12,5 мм и диаметром 12 мм

На вставках всех рисунков приведены диаметральные поперечные распределения акустического поля в плоскостях, перпендикулярных оси пьезопластины, на разных расстояниях от вершины пьезопластины. Для

главного максимума и последнего минимума диаметральное поперечное распределение поля представлено в диапазоне от -15 до 15 мм вдоль оси x (рис. 2, 3 и 5), для рис. 4 – в диапазоне от -20 до 20 мм, а для расстояния 100 мм от центра пьезопластины вдоль оси z – от -150 до 150 мм (рис. 2, 3 и 5), для рис. 4 – от -100 до 100 мм.

Расстояния на горизонтальной оси вставок приведены в миллиметрах, а давления в относительных единицах. Пьезопластины нагружены на воду и работают в непрерывном режиме на резонансной частоте 5 МГЦ.

Проведенный анализ показал, что для всех рассмотренных пьезопластин с разными размерами в распределении давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины можно выделить ближнюю и дальнюю зоны с разным характером изменения давления акустической волны. В диаметральном сечении в плоскости, перпендикулярной оси пьезопластины на фокальном расстоянии от пластины наблюдается центральный максимум, амплитуда которого превышает значение боковых максимумов, а на расстоянии, где наблюдается последний минимум поле носит изрезанный характер.



Рис. 3. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 12,5 мм и диаметром 24 мм

Для пьезопластин с диаметром большим, чем значение параметра параболы *q* (рис. 3) наблюдается смещение последнего минимума в область главного максимума.



Рис. 4. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 25 мм и диаметром 12 мм

Распределение давления в этой области в диаметральном сечении носит неравномерный характер с максимальным значением на оси пьезопластины. Характер распределения давления в точке главного максимума и в дальней зоне аналогичен предыдущему случаю.



Рис. 5. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 25 мм и диаметром 24 мм

С увеличением параметра параболы, как видно из рис. 4, 5 существенных изменений характера распределения акустического давления вдоль оси пьезопластины как в ближней, так и в дальней зонах не наблюдается, а также нет изменений акустического давления в диаметральном сечении акустического пучка. В дальней же зоне для всех исследованных типоразмеров пьезопластин наблюдается интересная особенность акустического поля, заключающаяся в том, что энергия акустической волны в дальней зоне распространяется не только вблизи оси пьезопластины, но и вдали от нее, что видно из диаметрального распределения акустического давления на расстоянии 100 мм от вершины параболоида (см. рис. 2–5). Видно, что на этом расстоянии диаметральное распределение акустического давления носит изрезанный характер с центральным максимумом на оси пьезопластины и рядом других максимумов, расположенных вдали от оси пьезопластины. При этом самой большой максимум акустического давления вне оси пьезопластины сравним с центральным максимумом или даже превышает его значение.

На рис. 6 представлена зависимость диаметра *d* основного максимума акустического пучка по уровню половинной амплитуды на разных расстояниях от пьезопластины для пьезопластины диаметром 12 мм и параметром параболы 12,5 мм.



Рис. 6. Зависимость ширины главного максимума в зависимости от расстояния вдоль оси пьезопластины

Из приведенного рисунка видно, что диаметр основного максимума акустического пучка пьезопластины практически линейно увеличивается при удалении от пьезопластины. При этом угол расходимости пучка составляет 1,5 градуса.

Таким образом, проведенный расчет акустического поля параболоидного пьезопреобразователя показал, что вид акустического поля в дальней зоне отличается от вида аналогичного поля для сферических и плоских пьезопластин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Борисов, В. И. Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2 (43). – С. 105–113.

3. Борисов, И. И. Тонкая структура акустического поля излучения пьезопреобразователей на основе круглых пьезопластин / И. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3 (48). – С. 102–108.

4. Структура акустического поля излучения фокусирующих пьезопреобразователей / В. И. Борисов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1 (54). – С. 119–127.

УДК 624.729.14:620.179.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ИТЕРАЦИОННОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ МЕТОДАМИ OS-SART И OS-HBIR С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПОРЯДОЧЕННЫХ ПОДМНОЖЕСТВ ПРОЕКЦИЙ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, С. А. ЗОЛОТАРЕВ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси» Минск, Беларусь

UDC 624.729.14:620.179.15

RESEARCH OF ITERATIVE RECONSTRUCTION BY OS-SART AND OS-HBIR METHODS USING ORDERED SUBSET PROJECTIONS *V. L. VENGRINOVICH, S. A. ZOLOTAREV*

Аннотация

Статистический метод максимального правдоподобия (ЕМ) и алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями (SART) являются двумя методами итерационной томографической реконструкции. Эти алгоритмы часто используются, когда проекционные данные содержат большое количество статистического шума или были получены из ограниченного диапазона углов. Один из популярных подходов, используемых для повышения скорости сходимости этих алгоритмов заключается в том, чтобы выполнять коррекцию текущего приближения реконструируемого объекта на подмножествах проекционных данных. Стремление повысить скорость сходимости итерационных методов привело к использованию упорядоченных подмножеств проекций как для метода максимального правдоподобия ЕМ (OS-EM) так и для алгебраического метода реконструкции с одновременными итерациями SART (OS-SART). Эффективность использования упорядоченных подмножеств проекций была установлена сначала для последовательных программ, которые выполняются на центральном процессоре компьютера (CPU). В данной работе оба этих метода были ускорены с помощью использования графической библиотеки OpenGL путем их отражения на архитектуру графического процессора видеокарты.

Ключевые слова:

коническая томография, итерационная реконструкция изображений, OS-SART, OS-HBIR

Abstract

The statistical maximum likelihood (EM) method and the algebraic reconstruction method with simultaneous iterations (SART) are two methods of iterative tomographic reconstruction. These algorithms are often used when the projection data contains a large amount of statistical noise or has been obtained from a limited range of angles. One of the popular approaches used to increase the rate of convergence of these algorithms is to perform a correction of the current approximation of the reconstructed object on subsets of the projection data. The desire to increase the convergence rate of the iterative methods led to the use of ordered subsets of projections for both the maximum likelihood method of EM (OS-EM) and for the algebraic reconstruction method with simultaneous iterations of SART (OS-SART). The efficiency of using ordered subsets of projections was first established for sequential programs that run on the central processor of the computer (CPU). In this work, both these methods have been accelerated by using the OpenGL graphics library by mirroring them on the graphics processor architecture of the video card.

Key words:

cone beam computed tomography, iterative image reconstruction, OS-SART, OS-HBIR/ $\!$

Введение

Методы реконструкции компьютерной томографии можно условно разделить на два класса: аналитические и итерационные алгоритмы [1]. Все аналитические алгоритмы используют преобразование Радона и теорему о центральном сечении.

Преобразованием Радона функции *f*(*x*, *y*)называется функция

$$R(s,\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s\cos\alpha - z\sin\alpha, s\sin\alpha + z\cos\alpha) dz.$$
(1)

Преобразование Радона имеет простой геометрический смысл – это интеграл от функции f(x,y) вдоль прямой, перпендикулярной вектору $\vec{n} = (\cos \alpha, \sin \alpha)$ и проходящей на расстоянии *s* (измеренном вдоль вектора \vec{n} , с соответствующим знаком) от начала координат.

Известна формула обратного преобразования Радона

$$f(x,y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} \exp(i\omega(x\cos\alpha + y\sin\alpha)\tilde{R}(\omega,\alpha)\omega d\omega d\alpha), \qquad (2)$$

где $\tilde{R}(\omega, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} R(s, \alpha) \exp(-i\omega s) ds$.

Выражение (2), помимо того что является одним из вариантов записи обратного преобразования Радона, также определяет метод реконструкции функции из её проекций $R(s, \alpha_i)$, называемый специалистами методом Фурье-синтеза.

Наиболее популярные методы используют фильтрацию при осуществлении обратного проецирования (FBP) [2] для двухмерного случая. Метод Фельдкампа (ФДК) для трехмерного случая также предусматривает необходимость фильтрации при осуществлении обратного проецирования [3]. Когда число отсканированных рентгеновских проекций при вращении рентгеновского источника вокруг объекта достаточно велико, выше приведенные методы могут произвести приближенную реконструкцию изображения отсканированного объекта. Простота этих методов гарантирует эффективность вычислительных операций, что например, делает их популярными для многих клинических применений.

Для другой категории алгоритмов, так называемых, итерационных методов реконструкции задача реконструкции изображения сводится к задаче решения очень большой и одновременно разреженной системы линейных уравнений, к задаче линейной алгебры. При этом, процедура реконструкции сводится к решению системы уравнений. Итерационные методы могут быть дополнительно разделены, например, на методы проецирования на выпуклые множества (POCS) алгоритмы, т. к. SART [4], SIRT [5], и POCS [6].

Алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями SART (OS-SART)

Статистический метод максимального правдоподобия *(EM)* и алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями *(SART)* являются двумя методами итерационной томографической реконструкции.

Один из популярных подходов, используемых для повышения скорости сходимости этих алгоритмов заключается в том, чтобы выполнять коррекцию текущего приближения реконструируемого объекта на подмножествах проекционных данных. Необходимость повышения скорости сходимости итерационного процесса реконструкции привела к созданию метода упорядоченных подмножеств для метода максимального правдоподобия *EM (OS-EM)* и для алгебраического метода реконструкции с одновременными итерациями *SART (OS-SART)*.

Экспериментальные результаты

Были запрограммированы два алгоритма *OS-HBIR (HBIR*-Heuristic Bayesian Inference Engine) и *OS-SART*, а также проведена серия реконструкций специального фантома "*Rozi*", рентгеновская съемка которого была проведена в г. Гейдельберге (Германия) в немецком центре по исследованию рака – *DKFZ*.

Всего было снято 360 рентгеновских проекций через угловой интервал равный 1°. Разделение всех проекций на заданное количество упорядоченных подмножеств осуществлялось с помощью приведенного ниже участка программного кода:

```
for(jj=0;jj<num_os;jj++)
for(ii=0;ii<nprj_os;ii++)
{
    os_prj[jj][ii] =nprj_os*jj+ii;
    os_theta[jj][ii]=theta[nprj_os*jj+ii];
},</pre>
```

где идентификатор *num_os* представляет собой количество упорядоченных подмножеств проекций, а идентификатор *nprj_os* указывает количество проекций, которое входит в каждое упорядоченное подмножество проекций, а двумерный массив *os_theta[num_os][nprj_os]* задает угол проецирования \mathcal{G}_n для конкретной проекции, принадлежащей к заданному упорядоченному подмножеству проекций. Для проверки влияния количества упорядоченных подмножеств проекций на скорость сходимости итерационного процесса было рассмотрено 11 произвольно выбранных вариантов раз-

биения 360 проекций на упорядоченные подмножества проекций, представленных в табл. 1.

№ п/п	Число подмножеств	Число проекций в каждом из под-					
		множеств					
1)	5	72					
2)	6	60					
3)	8	45					
4)	10	36					
5)	12	30					
6)	15	24					
7)	18	20					
8)	20	18					
9)	24	15					
10)	36	10					
11)	72	5					

Табл. 1. Варианты разбиения на упорядоченные подмножества проекций

Приведем в табл. 2 среднее значение функционала ошибки для каждой итерации итерационного процесса реконструкции для каждого из 11 вариантов разбиения на упорядоченные подмножества проекций. Всего было сделано по 7 итераций для каждого варианта разбиения на упорядоченные подмножества проекций.

Табл. 2. Среднее значение функционала ошибки для 11 вариантов разбиения на упорядоченные подмножества проекций

Итер.	№ 1	<u>№</u> 2	<u>№</u> 3	<u>№</u> 4	<u>№</u> 5	<u>№</u> 6	<u>№</u> 7	<u>№</u> 8	<u>No</u> 9	№10	№11
1	9,791	9,275	8,279	8,164	8,338	8,701	9,104	9,244	9,516	10,072	10,341
2	3,112	2,987	2,804	2,719	2,700	2,756	2,790	2,794	2,811	2,875	2,885
3	2,446	2,375	2,179	2,139	2,106	2,084	2,066	2,067	2,053	2,049	2,026
4	2,237	2,169	2,029	1,998	1,962	1,934	1,910	1,909	1,895	1,886	1,864
5	2,188	2,116	1,976	1,954	1,920	1,899	1,878	1,877	1,861	1,847	1,812
6	2,159	2,084	1,957	1,937	1,904	1,887	1,866	1,864	1,847	1,832	1,788
7	2,160	2,079	1,957	1,935	1,902	1,884	1,863	1,860	1,842	1,827	1,777

Заключение

Рассматривая табл. 2 можно обратить внимание на то, что ошибка реконструкции уменьшается, а значит, увеличивается скорость сходимости итераций с ростом числа подмножеств. Но это является справедливым не для всех итераций. Поэтому, на основе данных численных экспериментов показано, что при применении алгебраического метода реконструкции с одновременными итерациями (OS-SART) для достижения оптимальной реконструкции необходимо, чтобы не только число упорядоченных подмножеств было больше девяти, а число итераций было равным максимально возможному для рассмотренной серии реконструкций, но необходимо каждый раз искать компромисс между ускорением сходимости алгоритма

и временем, которое потребуется для достижения требуемой точности реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венгринович, В. Л. Итерационные методы томографии / В. Л. Венгринович, С. А. Золотарев. – Минск : Белорусская наука, 2009. – 227 с.

2. Kak, A. C. Principles of computerized tomographic imaging / A. C. Kak, M. Slaney. – Piscataway, NJ : IEEE Press, 1988. – 327 p.

3. **Feldkamp, L. A.** Practical cone beam algorithm / L. A. Feldkamp, L.C. Davis, J.W. Kress // Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision. – 1984. – P. 612–619.

4. Andersen, A. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm / A. Andersen, A. Kak // Ultrasonic Imaging. – 1984. – Vol. 6. – P. 81–94.

5. **Gilbert, P.** Iterative methods for the 3D reconstruction of an object from projections / P. Gilbert // Journal of Theoretical Biology. – 1972. – Vol. 76. – P. 105–117.

6. **Yang, L.** Few-view image reconstruction with dual dictionaries / L. Yang, J. Zhao, G. Wang // Phys. Med. Biol.– 2012.– Vol. 57.– P. 173–189.

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

УДК 621.3.078.4 ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А. П. КОРНЕЕВ, Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ, И. С. СТАСЕНКО

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 621.3.078.4 INCREASING RELIABILITY OF LIFTING INSTALATION BY SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM A. P. KORNEEV, G.S. LENEVSKY, I.S. STASENKO

Аннотация

Представлен способ построения замкнутой системы управления электромеханической системы с распределенными параметрами с помощью корректирующего устройства, которое действует на основании восстановленных данных и находится в обратной связи. Предложена методика синтеза системы управления электромеханической системы с распределенными параметрами для повышения надежности грузоподъемных установок.

Ключевые слова:

система с распределенными параметрами, резонанс, корректирующее устройство, восстановление данных, гиперболическая тригонометрическая функция, грузоподъемная установка.

Abstract

A method for constructing a closed control system for an electromechanical system with distributed parameters by means of a correcting device that operates on the basis of the reconstructed data is presented and is in the feedback. A technique for synthesizing a control system for an electromechanical system with distributed parameters is proposed to increase the reliability of lifting equipment.

Key words:

distributed parameters system, resonance, correction device, data recovery, hyperbolic trigonometric function, lifting installation.

Многочисленные объекты различных областей техники представляют собой системы с распределенными параметрами. К ним относятся линии электропередач, трубопроводы для перекачки воды и нефти, устройства, содержащие длинные стержни (например, в бурильной установке – колонна труб, в глубинно-насосных установках – штанга, в подъемных механизмах – трос и канат) и т. д. [1, 2].

Основное направление проводимых исследований – создание комплексной методики проектирования системы электропривода как единой электромеханической системы с учетом существенного распределения параметров и связей и реальных условий промышленной эксплуатации. Следует указать на проблему поиска оптимальных структур, обеспечивающих высокое качество динамики в условиях взаимосвязи электрических, механических и технологических факторов, естественной вариации параметров.

При функционировании постоянно изменяется переменная *x*, характеризующая относительное положение рабочей массы (груза) в системе с распределенными параметрами. Наибольшее влияние на работу оказывает изменение частоты первого резонанса, так как изменяется полоса пропускания привода, что требует изменения настроек системы управления электропривода [3, 4].

Наличие упругости в объекте управления оказывает существенное влияние на работу системы управления и заставляет отходить от стандартных настроек жестких систем. Возможным решением является применение корректирующего устройства, которое действует на основании восстановленных данных.

Передаточные функции системы с распределенными параметрами обладают ярко выраженными резонансными свойствами, практически исключающими возможность расширения полосы пропускания разомкнутой системы за частоту первого резонанса при нерезонансном регуляторе [5].

Построение замкнутой системы управления электропривода системы с распределенными параметрами, механическая часть которых обладает, в основном, пространственно протяженными размерами, возможно при использовании корректирующего устройства, действующего на основании восстановления данных [6].

Использование в системе дополнительной обратной связи, снимаемой в точке *x*, дает принципиальную возможность построения системы с расширенной полосой пропускания. На рис.1 представлена структурная схема предлагаемого способа.



Рис. 1. Структурная схема системы с расширенной полосой пропускания: Uz – сигнал задания (задающее воздействие); Wpc(p) – регулятор скорости; Wpт(p) – регулятор тока; Wc(p) – часть ЭП с постоянными параметрами; Wpп(p) – механическая часть ЭП с распределенными параметрами

Непосредственное измерение скорости рабочей массы (груза) в системе с распределенными параметрами затруднительно, так как механическая часть обладает, в основном, пространственно протяженными размерами. Это возможно при применении корректирующего устройства, действующего на основании восстановления данных.

Характеристическое уравнение движущего усилия к скорости перемещения для любого сечения известно:

$$W_{xx}(x,p) = 2 \cdot a \cdot (\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \tilde{p}^2 \cdot [ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p} \cdot \tilde{x})] + (\mu_1 + \mu_2) \cdot \tilde{p} \cdot sh(\tilde{p}) \cdot ch(\tilde{p}) + sh^2(\tilde{p})),$$

где х – текущее расстояние между центром массы 1 и грузом, м; L – расстояние между центрами масс, м; $\tilde{x} = 1 - \frac{x}{L}$ – относительная координата выходной точки; $\mu_i = M_i/Mk - i$ -ая относительная масса; а – скорость волны распространения колебаний, м/с; $\tilde{p} = p \frac{L}{a}$ – нормированный оператор Лапласа.

Передаточная функция движущего усилия к скорости перемещения для произвольного сечения [7]:

W(x, p)=
$$\frac{ch(\tilde{p} \cdot \tilde{x}) \cdot sh(\tilde{p})}{W_{xx}(x, p)}$$
.

Передаточная функция движущего усилия к скорости вала двигателя:

$$W_{1}(\mathbf{x},p) = \frac{ch(\tilde{p}\cdot\tilde{x})\cdot sh(\tilde{p})}{W_{xx}(\mathbf{x},p)} + \frac{\mu_{2}\cdot\tilde{p}\cdot (ch^{2}(\tilde{p}) - ch^{2}(\tilde{p}\cdot\tilde{x}))}{W_{xx}(\mathbf{x},p)}$$

На основании приведенных передаточных функций, описывающих состояние системы с распределенными параметрами кольцевого типа в различных точках можно определить функцию, позволяющую преобразовать один сигнал в другой – корректирующего устройства [8].

Отношение передаточных функций:

$$W_{KY}(\mathbf{x},p) = \frac{ch(\widetilde{p}\cdot\widetilde{x})\cdot sh(\widetilde{p})}{\mu_2\cdot\widetilde{p}\cdot[(ch^2(\widetilde{p})-ch^2(\widetilde{p}\cdot\widetilde{x})]+sh(\widetilde{p})\cdot ch(\widetilde{p}))]}$$

В результате преобразования передаточная функция приведена к более простой и удобной форме:

$$W_{KV}(\mathbf{x}, p) = \frac{sh(\tilde{p}) \cdot ch(\tilde{p})}{sh(\tilde{p}) \cdot ch(\tilde{p}) + \mu_2 \cdot \tilde{p} \cdot (ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p} \cdot \tilde{x}))}$$

Графическое представление корректирующего устройства представлено на рис. 2.



Рис. 2. Графическое представление корректирующего устройства: $v_x(p)$ – скорость перемещения для произвольного сечения; v(p) – скорость вала двигателя; Wk(x,p) – вспомогательная передаточная функция; μ_2 – относительная масса груза; \tilde{p} – нормированный оператор Лапласа

При этом передаточная функция W_k(x,p), которая является более простой и удобной для исследования и моделирования, имеет вид:

$$W_{k}(x,p) = \frac{ch^{2}(\widetilde{p}) - ch^{2}(\widetilde{p} \cdot \widetilde{x})}{ch(\widetilde{p} \cdot \widetilde{x}) \cdot sh(\widetilde{p})},$$

Аппроксимация передаточной функции позволяет учитывать изменение резонансных свойств системы с распределенными параметрами при изменении парциальных параметров.

Преимущества полученной передаточной функции:

 отсутствие зависимости передаточной функции и, следовательно, нулей и полюсов от первой и второй присоединенной массы;

– отсутствие степеней при р выше первой в знаменателе, что упрощает ее исследование;

– отсутствие слагаемых в знаменателе, позволяющее ее дальнейшее преобразование и упрощение.

Недостатки полученной передаточной функции:

– наличие гиперболических тригонометрических функций, усложняющее исследование;

 наличие дифференцирующего звена, которое негативно сказывается на реализации передаточной функции.

Для исследования электромеханических характеристик системы с распределенными параметрами разработан экспериментальный стенд со следующими параметрами: $\mu_1 = 0.87$, $\mu_2 = 0.46$, a = 23.5 м/с, Lmax – 7 м.

К таким системам могут быть отнесены электроприводы подачи платформы крупногабаритных армирующих манипуляторов, приводы шахтных подъемников, лифтов и других подъемных механизмов, транспортеров и т. д. Количество масс, сосредоточенных на системы с распределенными параметрами, может колебаться от 1–2 до 10 и более.

На рис 3. тонкой линией представлена логарифмическая амплитудночастотная характеристика (ЛАЧХ) системы с распределенными параметрами без дополнительного контура по пространственной координате, а сплошной – ЛАЧХ системы с распределенными параметрами с дополнительным контуром по пространственной координате, полученные для экспериментального стенда.



Рис. 3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика системы с распределенными параметрами

В исследуемой системе с распределенными параметрами без дополнительного контура по пространственной координате первый резонанс расположен на частоте 0,63 Гц, в системе с распределенными параметрами с дополнительным контуром по пространственной координате – 1,31 Гц.

Т.е. полоса пропускания системы расширена более чем в 2 раза. Фактически это означает, что при введении дополнительного контура, первый резонанс (наиболее опасный) сглаживается. Это приводит к тому, что резонансы на более высоких частотах влияют гораздо меньше из-за меньшего коэффициента усиления. Использование резонансного регулятора скорости является более сложным, так как резонансные частоты при функционировании изменяются, что потребует усложнения резонансного регулятора скорости.

Для расчета резонансных частот в системе с распределенными параметрами при изменении массы и положения груза может использоваться программа [9].

Методика синтеза системы управления электромеханической системы с распределенными параметрами заключается в следующем:

1) определяем необходимые параметры корректирующего устройства скорости (расстояние между центром массы 1 и грузом, расстояние между центрами масс системы с распределенными параметрами, относительную координату выходной точки (груза), относительную массу груза, скорость волны распространения колебаний, нормированный оператор Лапласа);

2) в описанном выше порядке реализуем корректирующее устройство перемещающегося груза;

3) используя полученное корректирующее устройство, реализуем дополнительный контур по скорости, который расширяет полосу пропускания системы более чем в 2 раза и устраняет первый (наиболее опасный) резонанс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассудов, Л. Н. Электроприводы с распределёнными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 144 с.

2. Башарин, А. В. Параметрическая идентификация промышленных объектов с упругими связями первого и второго рода / А. В. Башарин, М. Ф. Будилов, С. Б. Федотовский // Многомерные электромеханические системы : межвузов. сб. – Л. : СЗПИ, 1986. – С. 19–29.

3. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / М. П. Белов [и др.] // Электротехника. – 2003. – № 5.– С. 12–16.

4. Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1975. – 230 с.

5. **Кузовков, Н. Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.

6. Толочко, О. І. Анализ та синтез електромеханічных систем зі спостерігачами стану / О. І. Толочко. – Донецк : Норд-Пресс, 2004. – 298 с.

7. Змеу, К. В. Передаточные функции волновых одномерных точечнонеоднородных кольцевых объектов / К. В. Змеу, Л. Н. Рассудов // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 5. – С. 52–56.

8. **Корнеев, А. П.** Метод косвенного вычисления скорости в системах с распределенными параметрами / А. П. Корнеев, В. Н. Ситников // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 2. – С. 93–98

9. Программа «Расчет распределения резонансных частот при различном положении и различной массе груза» / П. П. Корнеев, Г. С. Леневский ; зарегистрирована в Нац. центре интел. собствен. РБ. – заявка C20150095 от 02.10.15, свид. № 827.

УДК 621.3

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ПРИВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. А. КОРНЕЕВ, А. С. ТРЕТЬЯКОВ, А. П. СЕРИКОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 621.3

NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF SWITCHED RELUCTANCE DRIVE WITH HELP OF COMPUTER TECHNOLOGIES A. A. KARNEYEU, A. S. TRETSIAKOU, A. P. SERIKOU

Аннотация

В данной работе перечисляются потенциальные неисправности вентильноиндукторного привода (ВИП) как со стороны двигателя, так и со стороны преобразователя. Определяются методы неразрушающего контроля ВИП для установления неисправностей. Указывается программное обеспечение для проведения моделирования аварийных режимов.

Ключевые слова:

вентильно-индукторный привод, неразрушающий контроль, отказоустойчивость, компьютерные технологии.

Abstract

Potential motor and converter faults of switched reluctance motor (SRM) are listed in this paper. Methods of non-destructive fault testing of SRM are presented. The software for simulation of SRM under fault condition is described.

Key words:

switched reluctance motor, non-destructive testing, fault-tolerant systems, computer technologies.

Обслуживание и замена электрооборудования в некоторых случаях не представляется возможной, например, во время полета самолета. В таких случаях отказоустойчивость оборудования является очень важной характеристикой.

В ряде публикаций [1, 2] утверждается, что вентильно-индукторные привода (ВИП) обладают уникальной характеристикой, которая повышает надежность двигателя – данный двигатель имеет возможность продолжать работу, несмотря на неполадки в обмотке либо в силовой схеме преобразователя. Магнитная независимость фаз двигателя и ассиметричная схема преобразователя позволяют ВИП продолжать работу при выходе из строя одной или более фаз (в зависимости от конструкции двигателя). Однако для стабильного, безопасного продолжения работы при появлении неполадки в силовой цепи, системе управления необходимо получить детальную информацию о данной неполадке. Эта система должна выбрать требуемый алгоритм работы в зависимости от полученной информации. Например, при выходе из строя одной из фаз, микропроцессорной системе управления необходимо установить неисправную фазу, а затем отключить секцию преобразователя, работающую с ней.

Таким образом, данная работа ставит целью определить методы неразрушающего контроля ВИП для получения информации о неисправностях. Эта информация необходима системе управления для определения требуемого аварийного алгоритма работы. Для достижения поставленной цели установим перечень возможных неполадок и впоследствии определим методы диагностики. Неисправности могут возникать как в двигателе, так и в преобразователе. Будем рассматривать их и их диагностику раздельно. Также рассмотрим программное обеспечение, помогающее проводить исследования в данном направлении.

Перечислим возможные неисправности в двигателе:

- разрыв цепи в одной из обмоток фазы;

- короткое замыкание на стороне одной из обмоток фазы;

– ротор сдвинут от центра (не центрирован в статоре), что приводит к разному воздушному зазору.

В результате первых двух неисправностей магнитный поток становится несбалансированным. При последней неисправности также наблюдается дисбаланс сил, приложенных к ротору, однако, уровень дисбаланса не так критичен [3]. В целом данные неисправности могут привести к повышенным вибрациям, частичной потере мощности, выходу из строя фазы двигателя и преобразователя.



Рис. 1. Дополнительная пара обмоток

Для определения вышеуказанных неисправностей в [4] было предложено использовать дополнительную пару обмоток (рис. 1). При нормальной работе потокосцепление обмоток 1 и 2 одинаково, по этой причине наведенная ЭДС в обмотках одинакова. Если данные обмотки соединены встречно, то, при нормальных условиях, напряжение между точками X и Y равно нулю. Какое-либо напряжение, появляющееся между точками X и Y, сигнализирует о несбалансированном магнитном потоке. Данные обмотки также позволяют определить дисбаланс, вызванный сдвигом положения ротора.

Асимметричная трехфазная силовая схема преобразователя изображена на рис. 2. В плече данной схемы присутствует два силовых транзистора и два шунтирующих диода.

Определим возможные неисправности, связанные с транзисторами и шунтирующими диодами:

– пробой верхнего или нижнего транзистора;

– несрабатывание верхнего или нижнего транзистора, то есть постоянное нахождение в разомкнутом состоянии;

– одновременный пробой верхнего и нижнего транзистора;

– короткое замыкание либо размыкание цепи по причине выхода из строя шунтирующих диодов.

Последствия последних двух неисправностей почти одинаковы. Они заключаются в появлении тока короткого замыкания в фазе, что приводит к выходу из строя силовой цепи преобразователя.



Рис. 2. Асимметричная трехфазная силовая схема

В [5] было предложено два метода диагностики неполадок силовой схемы преобразователя. Суть методов заключается в определении значения тока в режиме реального времени в определенной точке силовой схемы. Далее происходит обработка результата и указание места неисправности при её наличии. Первый метод использует один датчик тока, второй – два датчика тока. Данные методы были проверены экспериментально и подтвердили свою эффективность.

Определение возможных аварийных токов в моторе и преобразователе сложная проблема. Решить её помогает специализированное программное обеспечение, такое как PC-SRD Dynamic. Эта программа описывается в [3]. Она предназначена для разработки вентильно-индукторных двигателей и преобразователей для них. Данная программа позволяет полностью моделировать систему управления.

Программа включает в свою структуру следующие элементы:

– электромагнитную модель вентильно-индукторного двигателя и преобразователя;

– модель нагрузки;

– ПИД регулятор скорости;

- систему расчета углов подачи напряжения;

– модель датчика положения ротора.

Данная программа позволяет моделировать аварийные режимы: разрыв цепи, короткое замыкание, нарушение работы системы управления. Для этих целей она использовалась в [3, 6].

В ходе работы были выявлены основные возможные неисправности ВИП. Были определены методы неразрушающего контроля для определения неисправностей ВИП. При условии применения данных методов, ВИП может продолжать работу при неполадках в фазе двигателя либо неисправности в плече силовой схемы преобразователя. Это может происходить следующим образом: микропроцессорная система получает аварийный сигнал от датчика и реорганизует работу преобразователя с учетом типа неисправности. В данной работе также была рассмотрена программа, позволяющая моделировать работу ВИП в аварийных режимах. Применение данного рода программ значительно упрощает анализ режимов работы двигателя.

На сегодняшний день рассматривается возможность применения и проверки полученных результатов в разрабатываемом оборудовании для исследования ВИП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Темирев, А. П.** Математическое моделирование, проектирование и экспериментальное определение параметров вентильно-индукторных электроприводов: монография / А. П. Темирев. – Новочеркасск : ЛИК, 2011. – 794 с.

2. Miller, T. J. E. Switched Reluctance Motor and Their Control / T. J. E. Miller. – London, U.K. : Magna Physics Publishing and Oxford Univ. Press, 1993.

3. Miller, T. J. E. Faults and unbalance forces in the switched reluctance machine / T. J. E. Miller // IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 2, pp. 319–328, Mar./Apr.1995.

4. **Stephens, C. M.** Fault detection and management system for fault tolerant switched reluctance motor drives / C. M. Stephens // IAS Annu. Meeting. – 1989. – pp. 574–578.

5. **Chen, H.** Fault Diagnosis Digital Method for Power Transistors in Power Converters of Switched Reluctance Motors / H. Chen, S. Lu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – vol. 60, no. 2, Feb. 2013. – P.749–763.

6. Chindurza, I. Non-invasive fault diagnosis for switched reluctance machines with incorrect winding turns, inter-turn winding faults and eccentric rotors / I. Chindurza, D.G. Dorrell, C. Cossar // in Proc. 5th Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems(PEDS). – Valencia, Spain, Nov. – vol. 1, 2003. – P. 485–490.

УДК 681.51

СЕРВИСНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. А. КОСАЧ, Е. Е. КОВШОВ

АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой» Москва, Россия

UDC 681.51

SERVICE-ORIENTED SOLUTIONS AS A MEANS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL DATA PROCESSING OF DIGITAL PRODUCTION *A. A. KOSACH, E. E. KOVSHOV*

Аннотация

В настоящее время существует большое количество инструментов и систем для автоматизации процессов физических экспериментов, в частности - неразрушающего контроля. Отсутствие универсального подхода, разнообразие используемого оборудования, обработка и анализ потоков больших данных делают разработку любой автоматизированной системы управления в цифровом производстве весьма ресурсозатратной. Поэтому одной из важных научных и практических задач является разработка универсальной программной SOA-платформы для потоковой передачи данных и обработки результатов физических экспериментов, выполняемых в процессе неразрушающего контроля.

Ключевые слова:

дистанционный контроль герметичности, SOA, Big Data, кластерный анализ, SVM-классификатор, OPC-сервер.

Abstract

Now there is a large number of tools and systems for automating physical experiment processes, in particular – nondestructive testing. The lack of a universal approach, the variety of the technological equipment used, and the analysis of a large data stream make the development of any automated control system especially for digital manufacturing a laborious and costly task. One of the important scientific and practical tasks is the development of a universal software SOA-platform for streaming data collection and processing of the results of the physical experiments performed in the process of nondestructive testing of products.

Key words:

remote leakage detection, SOA, Big Data, Cluster analysis, SVM-classifier, OPC-server.

По мнению экспертов сегодня использование цифровых промышленных технологий для максимальной автоматизации различных производственных процессов и создания безлюдных технологий – ключевое направление технологического развития производств во всем мире, которое определяет их эффективность и конкурентоспособность.

Одной из основных тенденций развития прикладного программного обеспечения, в последнее время, стал переход от монолитной конструкции построения информационных систем к модульной, который существенно облегчает масштабирование программного обеспечения.

Последним этапом развития модульного программирования стала сервисно-ориентированная архитектура информационных систем (SOA) [1]. SOA – это модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределенных, слабо связанных стандартизированных компонентов (сервисов). Для сервисов характерны совместимость, гибкость и возможность их повторного использования. Соответственно, все функциональные возможности системы реализованы в компонентах, которые построены таким образом, что они практически не взаимосвязаны друг с другом. С ростом масштабов данных и расчетов внедрение информационных систем на основе SOA становится предпочтительным.

Создаваемая интеллектуальная программная платформа для сбора и обработки данных при неразрушающем контроле основана на сервисориентированной архитектуре программных решений (рис. 1) и является одной из информационных подсистем в структуре интегрированного цифрового производства.

Сервисы выполняют различные прикладные задачи (например, распознавание изображений для радиографического неразрушающего контроля, формирование заключений и т.д.) и объединяются друг с другом только для решения проблем, определенных их применением, показанным на модели.

Следует отметить, что в качестве механизма обеспечения взаимодействия сервисов друг с другом выступают бизнес-процессы. Бизнес-процесс представляет собой набор взаимосвязанных задач, и контролирует поток событий, вызывает и координирует сервисы и создает контекст для их взаимодействия. Бизнес-процесс – это абстрактный механизм, который не зависит от того, как реализуются сервисы и какую логику они несут в себе. Основной задачей бизнес-процесса является организация сервисов для его эффективной реализации.



Рис. 1. Макет программной платформы на основе SOA

Модуль оркестровки предназначен для выбора того или иного бизнеспроцесса, который взаимодействует с различными службами. Он определяет механизм взаимодействия службы на основе логики бизнес-процесса и представляет собой последовательность действий, выполняемых службами. Корпоративная шина (в данном случае ESB) обеспечивает среду для взаимодействия с сервисом. Одним из наиболее рациональных способов внедрения сервисориентированного подхода является использование web-сервисов, когда сервисно-ориентированная модель охватывает все уровни управления данными в программной платформе на основе SOA. В ней так же нет распределения по поставщикам и потребителям, поскольку вся необходимая информация о сервисах находится в реестре. Для более сложного и углубленного анализа данных могут быть применены сервисы, расположенные в общедоступном, частном или гибридном облаке [2].

Разработана и протестирована (в составе платформы SOA) интеллектуальная программная платформа для сбора и обработки данных автоматизированной информационно-измерительной системы контроля герметичности масс-спектрометрическим методом [3].

Для обработки данных использован гибридный подход: разделение данных обеспечивается методом классификации на основе ансамбля SVM-классификаторов (Support Vector Machines) [4], разбиение по группам и анализ данных после получения проводится на основе кластерного анализа по взвешенному попарному среднему. Оценка годности изделия основывается на сравнении значения потока пробного вещества, проникающего через сквозные дефекты, с браковочным уровнем, зависящим от норм герметичности. При превышении браковочного уровня изделие считается негерметичным.

Для внедрения информационно-измерительной системы управления использована корпоративная сервисная шина Open ESB [5]. Сервисы реализованы в виде web-сервисов, функциональная часть которых написана на языке Java. Системные элементы обмениваются сообщениями на основе протокола SOAP [6]. Для хранения данных и результатов расчетов применяется реляционная система управления базами данных с открытым программным кодом. Использование указанных технологий позволяет проводить анализ и фильтрацию данных, в том числе, и в основных программных средствах Microsoft Office (например, Microsoft Excel).

Для обмена информацией между частями информационноизмерительной системы применены OPC-серверы (OPC UA, OPC DA) и протоколы связи Modbus RTU и Modbus TCP (рис. 2).

ОРС представляет собой технологию, основанную на применении единого интерфейса управления устройствами [7], это особенно важно при автоматизации дистанционных систем контроля. Зачастую разработчикам автоматизированных систем приходится включать множество готовых драйверов в систему управления или использовать инструменты для разработки оригинальных протоколов обмена данными с нестандартными устройствами нижнего уровня. И при замене устройства на аналогичное другого производителя требуется существенно изменять программное обеспечение для управления этим устройством. Единый ОРС-интерфейс позволяет различным программным модулям, производимым разными компаниями, взаимодействовать друг с другом.



Рис. 2. Схема управления системой контроля герметичности в цифровом производстве

Разработанное программное обеспечение позволяет моделировать и документировать данные в режиме «off-line». Этот режим включает простые аналитические процедуры, а также график зависимости потока пробного вещества от времени, повторную фильтрацию данных и оценку качества изделия. Технологические документы (протоколы и заключения), основанные на результатах контроля, могут быть созданы как в электронном, так и бумажном виде.

Применение автоматизированной универсальной платформы на основе SOA с расширенным набором программных сервисов для сбора и анализа при проведении неразрушающего контроля позволяет снизить влияние человеческого фактора, повысить надежность информационноизмерительной системы и точность анализа данных и обеспечить переход к автоматизированному цифровому производству. Кроме того, миграция сервисов в облако и их SaaS-реализация [2] расширят спектр применимости прикладных программных решений, в частности, для обработки больших данных различных видов неразрушающего контроля и позволят привлечь независимых разработчиков для их (решений) инвариантности и большей интеллектуализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasiliev, Y. SOA and WS-BPEL / Published by Packt Publishing Ltd.32, 2007. - 314 p.

2. **Ковшов, Е. Е.** Разработка информационной системы для управления инновациями на основе "облачных" программных технологий / Е. Е. Ковшов, П. Н. Мартынов // Межотраслевая Информационная Служба. – 2012. – № 4. – С. 37–42.

3. Промышленная система дистанционного контроля герметичности на объектах использования атомной энергии / А. А. Косач [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2017. – т. 20 (№ 1) – С. 66–70.

4. **Demidova, L.** Big Data Classification Using the SVM Classifiers with the Modified Particle Swarm Optimization and the SVM Ensembles. / L. Demidova, E. Nikulchev, Y. Sokolova // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2016. – Vol. 7. N. 5. – P. 294–312.

5. Sun GlassFish Enterprise Service Bus [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа: http://download.oracle.com/docs/cd/E19182-01/index.html (дата обращения 15.05.2017).

6. SOAP Version 1.2 Part 0: Primer (Second Edition) / W3C Recommendation. – 27 April 2015.

7. **Mahnke, W.** OPC Unified Architecture / Wolfgang Mahnke, Stefan-Helmut Leitner, Matthias Damm. – Springer, 2009. – 340 p.

УДК 612 ИЕРАРХИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ОРГАНИЗАЦИИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

С. К. КРУТОЛЕВИЧ, А. Е. МИСНИК, Е. П. ЛУКЬЯНОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» Могилев, Беларусь

UDC 612

HIERARCHICAL METHOD OF INFORMATION SYSTEMS DESIGN AND DATA STORAGE ORGANIZATION FOR HAZARDOUS INDUSTRIAL EQUIPMENT RANKING S. K. KRUTALEVICH, A. E. MISNIK, E. P. LUKYANOV

Аннотация

Рассматриваются вопросы построения архитектуры базы данных для ранжирования оборудования на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.

Ключевые слова:

разработка информационных систем, архитектура базы данных, иерархическое хранение данных, иерархическая обработка данных, ранжирование.

Abstract

The article touches upon the issue of database architecture design for equipment ranking at oil refineries and petrochemical enterprises.

Key words:

information systems design, database architecture, hierarchical data storage, hierarchical data processing, ranking.

Обеспечению безопасной эксплуатации и предупреждению аварий на опасных производственных объектах уделяется огромное внимание во всех промышленно развитых странах. В Российской Федерации действует Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Он устанавливает какие производственные объекты являются опасными и разделяет их по рангам опасности.

Опасные производственные объекты в зависимости от уровня потенциальной опасности аварий на них подразделяются на четыре ранга опасности:

1) опасные производственные объекты чрезвычайно высокой опасности;

2) опасные производственные объекты высокой опасности;

- 3) опасные производственные объекты высокой опасности;
- 4) опасные производственные объекты низкой опасности.

Определение ранга позволяет обосновать периодичность и объем технического диагностирования производственных объектов.

ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр» г. Москва разработало стандарт ICTE 3-003-14 «Ранжирование технических устройств». Стандарт посвящен процедуре ранжирования технических устройств (ТУ), входящих в состав химических, нефтехимических и нефте- газоперерабатывающих производств.

Ранг учитывает разнообразные факторы, влияющие на состояние технических устройств: коррозионное воздействие среды, продолжительность эксплуатации, выявленные дефекты, степень опасности среды и др. Для определения ранга учитываются сотни параметров, каждый из которых может иметь десятки значений.

Очевидно, что разработка автоматизированной системы (AC) для хранения информации о состоянии ТУ и определения ранга является актуальной и нетривиальной задачей.

Архитектура АС определялась в соответствии со следующими требованиями:

– набор параметров ТУ, которые участвуют в ранжировании зависит от типа ТУ и заранее предусмотреть их набор невозможно;

 инженерные расчеты должны создаваться и редактироваться экспертами в области технической экспертизы промышленных объектов;

– пользователь должен иметь возможность варьировать набором полей на формах и широкими возможностями фильтрации данных;

– интерфейс должен максимально облегчать анализ текущего состояния тысяч ТУ;

– должна иметься возможность импорта и экспорта данных о состоянии ТУ и результатов технического диагностирования зон ТУ.

Анализ требований заказчика привел к трехуровневой, многомодульной архитектуре АС. На рис. 1 представлены основные модули и актеры, взаимодействующие с ними. На нижнем уровне расположены пользователи АС. Это эксперты, которые на основе анализа состояния ТУ выносят заключение о возможности дальнейшей эксплуатации ТУ. Они имеют возможность редактировать данные, создавать и редактировать расчеты. Средний уровень составляют архитекторы среды разработки и администраторы. Архитектор среды разработки – на основе типовой конфигурации создает рабочую конфигурацию приложения, которая учитывает особенности данного типа ТУ и учетную политику предприятий. Следует отметить, что архитектор среды разработки является специалистом в области технического диагностирования. Администратор прав доступа – создает и редактирует права доступа на изменение структуры и данных приложения. Администратор баз данных – устанавливает, вносит изменения, синхронизирует БД и удаляет приложение. Это уровень создания конфигурации приложения под конкретный тип ТУ и предприятие. На верхнем уровне специалисты IT-отдела ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр» г. Москва, которые разрабатывают и модернизируют модули АС.

Центральное место в разработке занимает «Модуль редактирования структуры типов объектов и типов данных». Основным объектом конфигурации является тип объекта. Под типом объекта понимают описание совокупности объектов с общими атрибутами. Каждый отдельный объект называется экземпляром типа. Атрибутом типа объекта называется именованное свойство, описывающее множество значений, которые могут принимать экземпляры этого типа. Каждый атрибут типа объекта характеризуется именем, уникальным в этом типе, и типом данных, которые данный атрибут будет хранить. Все экземпляры (объекты) одного типа имеют одинаковый набор атрибутов. Экземпляры типа отличаются друг от друга значениями атрибутов. Атрибуты, по значениям которых можно идентифицировать каждый объект от других объектов этого типа называются ключевые атрибуты.



Рис. 1. Основные модули АС
Например, можно выделить типы «Предприятие», «Цех», «Технологическая установка», «Сосуды и аппараты», «Трубопроводы», «Конструктивные элементы», «Зоны УЗТ».

На рис. 2 представлена структура таблиц базы данных. В таблице **obj_params** хранятся данные о каждом объекте. Таблицы **obj_tree** и **obj_relation** служат для создание иерархической структуры данных в виде дерева. В таблицах **param_value*** хранятся данные атрибутов объектов различных типов. На данном рисунке представлены таблицы только для трех типов данных: **dateTime, numeric, nvarchar.**



Рис. 2. Модуль «База данных» служит для хранения информации.

Предложенная структура позволяет:

 – создать набор атрибутов любого типа данных для каждого объекта без изменения структуры таблиц базы данных;

– ускорить обработку информации благодаря архитектуре древовидной структуры.

УДК 612

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ВЫБОРА ЕГО ПАРАМЕТРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ

А. С. КРЮКОВ, В. В. ЧЕГОДАЕВ, Н. П. КОДАК, В. П. ЛУНИН

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Москва, Россия

UDC 612

THE RESEARCH OF THE NUMERICAL MODEL OF THE EDDY CURRENT PROBE WHEN MONITORING ZIRCONIC PIPES A. S. KRYUKOV, V. V. CHEGODAEV, N. P. KODAK, V. P. LUNIN

Аннотация

Представлены результаты исследования численной модели вихретокового преобразователя (ВТП) с целью выбора его параметров при контроле циркониевых труб. В результате математического моделирования был спроектирован многоэлементный ВТП и подобраны условия вихретокового контроля. Получены сигналы от дефектов с различными геометрическими параметрами, анализ которых показал, что для регистрации наличия несплошностей необходимо использовать фазовый метод обработки вихретоковых данных.

Ключевые слова:

вихретоковый контроль, многоэлементный преобразователь, математическое моделирование, контроль труб.

Abstract

The exploration of a numerical model of the eddy current probe with the purpose of selecting its parameters in the control of zirconium pipes are represented in the article. As a result of mathematical modeling, a multi-element eddy current probe was constructed and the conditions for eddy current monitoring were chosen. Signals were received from defects with various geometric parameters. Its analysis was showed that it takes to use the phase method for processing eddy current data in order to detect the presence of the defects.

Key words:

eddy current control, multielement probe, mathematical modeling, pipe control.

Объектом контроля (ОК) в исследовании является оболочка тепловыделяющего элемента (твэла) [1], представляющая собой циркониевую трубку (рис. 1) с внешним диаметром $D_{\text{внеш}} = 9$ мм и внутренним диаметром $D_{\text{внутр}} = 8$ мм. Удельная электрическая проводимость циркония $\sigma = 2,44$ МСм/м.

В процессе изготовления в оболочке твэла могут возникать дефекты, приводящие к нарушению нормальной работы. Такие дефекты необходимо выявлять и локализовать на этапе производства. Для этого целесообразно

применять вихретоковый метод неразрушающего контроля (ВТК). Его преимуществами являются: высокая производительность, бесконтактность и высокая чувствительность [2].



Рис. 1. Объект контроля – оболочка тепловыделяющего элемента

Для выявления дефектов, оценки их формы и объема целесообразно использование многоэлементного накладного преобразователя (МНП), состоящего из нескольких одноэлементных накладных преобразователей (НВТП). Использование НВТП позволяет сконцентрировать вихревые токи на небольшой площади поверхности ОК. Он сохраняет основные достоинства вращающегося преобразователя и при этом устраняет его недостатки [3].

Математическая модель вихретокового контроля строилась в программном пакете *Comsol Multiphisycs* с помощью метода конечных элементов [4]. В модели учитывалось мультиплексирование преобразователей, т. е. было достаточно изучить взаимодействие только одного элемента МНП с ОК. Это позволило улучшить точность расчета при неизменном его времени.

Имеющийся стандартный образец предприятия (СОП) содержал контрольные дефекты, выполненные в виде сквозного радиального отверстия диаметром 0,15 мм (КД1) и в виде глухого радиального отверстия диаметром 0,15 мм и глубиной 0,2 мм (КД2). Для уменьшения влияния на сигнал физических и геометрических свойств ОК, а также условий окружающей среды, было решено использовать две катушки, включенные в мостовую схему.

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе была построена модель абсолютного накладного преобразователя (НВТП), с помощью которой были рассчитаны рабочая частота ВТК, диаметр ферритового сердечника и исследовано влияние зазора на величину сигналов от дефектов. На втором этапе была построена модель преобразователя, состоящего из двух катушек, рассчитаны база преобразователя и количество элементов МНП, получены сигналы от дефектов с реальными геометрическими размерами.

На рис. 2 изображена геометрия модели, содержащей абсолютный НВТП. Модель имеет симметрию, поэтому для уменьшения количества

конечных элементов и времени расчета была построена только ее половина. В среднем модель состоит из 200000 конечных элементов.



Рис. 2. Геометрия модели абсолютного НВТП

Эффективная глубина проникновения вихревых токов (ВТ) в ОК определяется физическими параметрами ОК: электрическая проводимость, магнитная проницаемость и геометрические параметры [2]. Были получены распределения вихревых токов в ОК при следующих значениях частоты возбуждающего тока: f = (200, 400, ..., 2000) кГц. На рис. 3 видно, что при частотах, превышающих частоту 1200 кГц, глубина проникновения меньше толщины стенки ОК. Для того, чтобы ВТ охватили толщину стенки оболочки твэла, в качестве рабочей была выбрана частота 1200 кГц.

Для расчета D_{cepd} были получены сигналы от дефекта КД2 при его перемещении вдоль оси X под НВТП для четырех значений $D_{cepd} = (0,5; 0,7; 1; 1,5)$ мм.



Рис. 3. Зависимость эффективной глубины проникновения от частоты возбуждающего тока

Было выявлено, что $D_{cepd} = 1$ мм обеспечивает максимальное вносимое дефектом напряжение и среднюю величину провала p, вызванное отсутствием ВТ непосредственно под сердечником (рис. 4). При X = 0 дефект располагается под НВТП.



Рис. 4. Сигнал от дефекта КД2 при Dcepд = 1 мм

При использовании НВТП в процессе вихретокового контроля одним из основных мешающих факторов является непостоянство величины воздушного зазора между НВТП и поверхностью ОК. С этой целью были получены сигналы от дефекта КД2 при 5 различных величинах воздушного зазора: (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4) мм.



Рис. 5. Годографы сигналов для всех значений зазоров

На рис. 5 изображены годографы полученных сигналов для всех значений зазоров. Основными информативными параметрами годографов сигналов являются: угол наклона годографа и амплитуда годографа.

Из рис. 6 видно, что при меньших значениях зазора влияние его изменения на сигнал сильнее, чем при больших значениях зазора. Но с увеличением воздушного зазора резко уменьшается амплитуда сигнала. Учитывая конструктивные требования при изготовлении НВТП, для расчетов величина воздушного зазора была принята равной 0,1 мм.

Для уменьшения влияния на информативный сигнал медленно изменяющихся вдоль оси физических и геометрических свойств ОК, условий окружающей среды, целесообразно использовать НВТП, состоящий из двух катушек, включенных в мостовую схему.

Для такой схемы включения важным параметром является база ВТП (b) – расстояние между осями ферритовых сердечников катушек. Для определения базы НВТП были получены сигналы от дефекта КД2 для значений b = (2, 3, 4) мм, анализ которых показал, что при b = 2 мм влияние катушек друг на друга слишком велико, а при b = 4 оно полностью отсутствует. Поэтому значение базы для НВТП было выбрано равным 3 мм.



Рис. 6. Зависимость амплитуды годографов от величины воздушного зазора

Полученное значение базы дает возможность рассчитать общее количество дифференциальных НВТП *n* в составе МНП [3]:

$$n = \frac{\pi D_{\text{внеш}}}{b} = 9, 4 \approx 10.$$

После расчета НВТП, состоящего из двух катушек, были получены сигналы от дефектов с различными геометрическими параметрами при прохождении дефекта под НВТП. В качестве дефекта использовался прямоугольный параллелепипед длиной l_{def} , шириной w_{def} и глубиной d_{def} . Все используемые значения представлены в табл. 1.



На рис. 7. представлены годографы сигналов от некоторых дефектов.

Рис. 7. Годографы сигналов от дефектов № 1, № 2, № 3

В табл. 2 отражены амплитуды и углы наклонов годографов для каждого из дефектов. Разброс углов наклонов годографов составляет 3,7°, что дает возможность применять фазовый метод определения наличия дефектов.

Табл.	1.	Геометрические	параметры
дефектов			

№ де-	l _{def} ,	W _{def} ,	d _{def} ,	$V \text{ MM}^3$	ſ
фекта	ММ	ММ	МКМ	<i>v</i> , ww	
1	0,60	0,30	24	0,00432	
2	0,45	0,27	31	0,00377	
3	0,83	0,54	70	0,03137	Ī
4	0,49	0,29	40	0,00568	-
9	0,38	0,36	46	0,00629	
10	0,54	0,26	35	0,00491	
11	0,56	0,24	46	0,00618	Ī
12	1,55	0,57	15	0,01325	

Т	абл.	2.	Амп	литу,	цы и	угли	Ы	наклон	ЮВ
годогр	рафо	вд	ля ка	ждоі	о из	дефе	ж	тов	

№ де-	Угол наклона	
фекта	годографа, °	7 Смплитуда, D
1	111,7	0,000329
2	112,0	0,000324
3	108,3	0,002002
4	111,1	0,000485
9	111,3	0,000529
10	111,1	0,000415
11	110,1	0,000546
12	108,8	0,000482

В результате математического моделирования был спроектирован мноэлементный ВТП, состоящий из 10 элементов, база которых 3 мм, воздушный зазор между МНП и ОК – 0,1 мм, количество витков каждой катушки – 90 (3 слоя по 30), диаметр ферритовых сердечников 1 мм, рабочая частота ВТК – 1,2 Мгц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлов, А. Г. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов : учебник для вузов / А. Г. Самойлов, В. С. Волков, М. И. Солонин. – М. : Энергоатомиздат, 1996.

2. **Герасимов, В. Г.** Неразрушающий контроль : 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль : практ. пособие / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – М. : Высш. шк., 1992.

3. Крюков, А. С. Оценка эффективности вихревых токов при проектировании многоэлементного преобразователя для контроля парогенераторных труб / А. С. Крюков, В. В. Чегодаев, В. П. Лунин // Вестник МЭИ. – 2013. – № 4. – С. 90–94.

4. **Лунин, В. П.** Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники / В. П. Лунин. – М., 1996.

E-mail: <u>sasa-mail@inbox.ru</u> <u>chegodaevvv@gmail.com</u> <u>valery.lunin@mtu-net.ru</u> <u>kodak_n@mail.ru</u>

УДК 65.011.56

CALS-ТЕХНОЛОГИИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

И. С. МОСКВИЧЕВА, Е. Е. КОВШОВ

АО «Научно исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой» Москва, Россия

CALS-TECHNOLOGIES IN PROVIDING NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF WELDED JOINT I. S. MOSKVICHEVA, E. E. KOVSHOV

Аннотация

Рассмотрены вопросы информационного обеспечения жизненного цикла АЭС, применению CALS-технологий в атомной отрасли. Освещены общие цели и принципы CALS-технологий, а также место неразрушающего контроля в системе управления крупного промышленного объекта. Подробно рассматривается жизненный цикл сварного соединения как составная часть процесса (подпроцесс) информационной системы управления жизненным циклом АЭС.

Ключевые слова:

CALS-технологии, интегрированная информационная система, жизненный цикл изделия, АЭС, неразрушающий контроль, сварное соединение.

Abstract

Devoting questions informational aided of life cycle of nuclear power plants, the application of CALS-technologies in the nuclear industry. The general goals and principles of CALS-technologies, as well as the space of nondestructive testing in the control system of a large industrial object, are considered. The life cycle of a welded joint is considered in detail as a subprocess of the NPP life cycle management information system.

Key words:

CALS-technology, integrated information system, product life cycle, nuclear power plant, non-destructive testing, welded joint.

Переход российской экономики на инновационный путь её развития требует внедрения передовых информационных технологий управления жизненным циклом наукоемких изделий.

Применение CALS-технологий в секторе энергетики очень перспективно, но использование таких технологий в данной отрасли на сегодняшний день незначительно.

Целью применения CALS-технологий как инструмента организации и информационной поддержки всех участников создания цифрового производства (далее – производства) и пользования продуктом является повышение эффективности их деятельности. Это возможно за счет ускорения

процессов исследования и разработки продукции, придания изделию новых свойств, сокращения издержек в процессах производства и эксплуатации продукции, повышения уровня сервиса в процессах ее эксплуатации и технического обслуживания [1].

Стратегия CALS-технологий включает в себя самые передовые, насущные идеи и цели, что отражает рис. 1. Реализация CALS-технологий в практическом плане предполагает организацию единого информационного пространства (интегрированной информационной среды), объединяющего автоматизированные системы, предназначенные как для эффективного решения задач инженерной деятельности, так и для планирования и управления производством и ресурсами предприятия [2].

Рассмотрим создание единого информационного пространства на примере Российской госкорпорации «Росатом», которая объединяет практически всех участников жизненного цикла (ЖЦ) такого крупного промышленного объекта, как АЭС: проектантов, производителей оборудования, строителей, эксплуатантов, а также – организации, занимающиеся их утилизацией.



Рис. 1. Стратегия CALS-технологий

Концептуальная схема организации интегрированной информационной системы в рамках ЖЦ АЭС представлена на рис. 2.

Применение обозначенного выше подхода (рис. 2) обеспечивает определенные преимущества всем участникам ЖЦ АЭС. На нижнем уровне такая информационная система объединяет данные, поступающие в нее из различных систем проектирования, хранения эксплуатационной и конструкторской документации, систем фиксации показателей работы оборудования, систем ввода данных о контроле и ремонте и др.



Рис. 2. Жизненный цикл АЭС

Наиболее рациональна разработка такой системы в режиме декомпозиции или – «по частям», т. е. создание автоматизированного информационного сопровождения небольших подпроцессов. Одним из таких подпроцессов является техническое обслуживание и ремонт оборудования при его эксплуатации на АЭС. В числе автоматизированных функций, инкорпорированных в информационную систему технического обслуживания и ремонта, учет оборудования, ведение данных по составу изделий, ведение журналов по проведенному и планируемому неразрушающему контролю (HK), обнаруженным дефектам и другое.

НК на строящейся станции при поступлении оборудования подлежат монтажные сварные соединения. Информация о технологии изготовления и качестве сварных швов в составе изделия поступает вместе с комплектом документации в виде технологических карт (ТК), протоколов и заключений. Вся эта информация необходима для проведения последующего технического обслуживания оборудования, анализа и расчетов прочности и остаточного ресурса.

ЖЦ сварного соединения начинается с момента сварки, продолжается обязательным контролем после сварки, эксплуатацией и эксплуатационным контролем, заканчивается окончанием срока службы оборудования или плановым или внеплановым ремонтом. И на всех этих этапах крайне важна для обеспечения безопасности информация о состоянии отдельно взятого сварного соединения с учетом его документационного обеспечения в конкретный момент времени.

Разработка и согласование технической документации при строительстве и эксплуатации объектов АЭС является основным процессом, занимающим большое количество времени [3–5]. На сегодняшний день не существует единой информационной базы, объединяющей данные всех участников подготовки, строительства, эксплуатации объекта в режиме реального времени. Предлагаемая структурная схема взаимодействия участников работ на АЭС и обмена информацией о состоянии сварных соединений изображена на рис. 3. Согласно схеме прикладное программное обеспечение содержит всю исходную информацию об изделии от проектировщика, а также вновь вносимую или изменяемую информацию о состоянии сварных соединений от эксплуатантов (результаты предэксплуатационного и эксплуатационного контроля (ПЭК)).

Одним из элементов информационной системы управления АЭС является программа оповещения о плановом контроле конкретного сварного соединения, а также о методе или комплексе методов НК, которые нужно применить; технологии (последовательности действий при контроле), критериях оценки качества сварного соединения, расчету даты его последующего контроля с учетом обнаруженных несплошностей (или их отсутствия) и т. д. Внедрение такой подсистемы послужит хорошей основой для создания интегрированной информационной системы в атомной отрасли, но это лишь ее часть.



Рис. 3. Организация информационного обмена состояния сварных соединений между участниками работ на АЭС

Кроме того, её (подсистему) необходимо интегрировать с разнообразным проектно-конструкторским программным обеспечением (CAD/CAM/CAE-системами).

Необходимо отметить, что в интеграции, безусловно, нуждаются системы хранения документации проектировщиков, системы подготовки производства (САРР-системы) и хранения технологической документации производителей (распределенными реляционными и объектноориентированными базами данных), а также со многими другими информационными подсистемами (рис. 4).



Рис. 4. Схема организации интегрированной информационной системы

Интегрированная информационная система, реализованная по такому принципу, обеспечит эффективную организацию деятельности предприятий атомной энергетической отрасли России на основе CALS-технологий, что является важной предпосылкой для реализации концепции цифрового производства и повышения их конкурентоспособности на мировом рынке оказания подобного рода разработок и услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головицына, М. В. Интеллектуальные САПР для разработки современных конструкций и технологических процессов [Электронный ресурс] / М. В. Головицына. – Режим доступа: <u>http://www.intuit.ru</u>.

2. Гудков, Д. Информационная поддержка изделия на всех этапах жизненного цикла (CALS «Continious acquisition and life-cycle support») [Электронный ресурс] / Д. Гудков. – Режим доступа: <u>http://www.espotec.ru</u>.

3. Ковшов, Е. Е. Автоматизация разработки технологических карт неразрушающего контроля как способ повышения экономической эффективности производства / Е. Е. Ковшов, И. С. Москвичева // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 53. – С. 454–458; URL: http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35932 (дата обращения: 20.06.2017).

4. **Ковшов, Е. Е.** Информационные и программные средства автоматизированной подсистемы разработки технологических карт неразрушающего контроля сварных соединений в промышленности / Е. Е. Ковшов, И. С. Москвичева // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9. – С. 51–56; URL: http://toptechnologies.ru/ru/article/view?id=36176 (дата обращения: 20.06.2017).

5. Москвичева, И. С. Моделирование конструкторско-технологического документооборота при генерации технологических карт неразрушающего контроля / И. С. Москвичева, Е. Е. Ковшов, В. С. Попов // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 6. – С. 58–63.

УДК 620.179.16+620.19+534.231

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОХОДНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК В ТРУБАХ И ПРУТКАХ

Ю. В. МЫШКИН, К. В. ПЕТРОВ

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова» Ижевск, Россия

UDC 620.179.16+620.19+534.231

MODELING THE ACOUSTIC FIELD OF THROUGH-TYPE ULTRASONIC TRANSDUCER AND PHASED ARRAYS IN PIPES AND BARS *YU. V. MYSHKIN, K. V. PETROV*

Аннотация

В работе представлены основные подходы к моделированию акустических полей проходных электромагнитно-акустических преобразователей и фазированных решеток для контроля прутков и труб. Рассмотрены особенности моделирования распространения акустических волн методом конечных элементов.

Ключевые слова:

численное моделирование, акустическое поле, электромагнитноакустический преобразователь (ЭМАП), метод конечных элементов, фокусировка, фазированная решётка, труба, пруток.

Abstract

In this work the basic approaches to modeling the acoustic fields of through-type electromagnetic-acoustic transducers and phased arrays for testing of bars and pipes are represented. The features of modeling the propagation of acoustic waves by finite element method are considered.

Key words:

numerical simulation, acoustic field, electromagnetic-acoustic transducer (EMAT), finite element method, focusing, phased array, pipe, bar.

На сегодняшний день неотъемлемым этапом при разработке эффективных ультразвуковых преобразователей, а также фазированных решеток является компьютерное моделирование. Моделирование позволяет на этапе проектирования выявить недостатки конструкции преобразователей, оптимизировать их с позиций максимальной эффективности преобразования [1, 2], исследовать и оптимизировать диаграмму направленности преобразователей и фазированных решеток [3, 4]. Также моделирование позволяет исследовать акустический тракт при контроле ультразвуковыми преобразователями [5], выявить закономерности взаимодействия акустических волн с дефектами различного типа [6, 7] и их местоположения в различных объектах контроля, тем самым определить влияние конкретного дефекта на результаты контроля.

При моделировании акустических полей и распространения акустических волн, как правило, используют специализированные программные продукты [8, 9]. Для учёта взаимодействия с другими видами полей, например, электромагнитным, применяют комплексный подход [6, 10–12] или возможности пакетных САЕ-программ, одним из которых является COMSOL Multiphysics.

Вызывают интерес акустические поля электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей и фазированных решеток в ограниченных пространствах, таких как прутки и трубы. Формирование акустических полей в ограниченных пространствах подчинено сложным процессам распространения и взаимодействия ультразвуковых волн, таким как отражение, трансформация, интерференция, дифракция и т.д., поэтому, использование классических подходов к расчету акустического поля затруднено. Эффективным способом расчета акустических полей ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток является моделирование методом конечных элементов. Одной из наиболее функциональных и перспективных программных сред для моделирования физических процессов является среда COMSOL Multiphysics. Данная программная среда позволяет рассчитывать электрические, магнитные, электромагнитные и акустические поля, что в целом дает возможность комплексного моделирования ЭМА преобразователя [1, 2, 6, 10–12].

Многие авторы используют метод конечных элементов для расчёта собственных частот трубопроводов [9, 13], моделирования подмагничивающих систем ЭМА преобразователей для труб [6, 10], распределения акустических полей в пластинах в частотной области [8, 14–16], при этом процессы распространения акустических волн в программе COMSOL Multiphysics не моделируются. В последнее время наибольший интерес учёной общественности в области волноводного метода контроля проявляется при исследовании влияния вязкоупругих контактных сред, таких как глина, песок, бетон, на затухание крутильных и продольных волн в трубах различного диаметра [9, 17].

Важным моментом при моделировании акустических полей методом конечных элементов является соблюдение условия по критерию Куранта– Фридрихса–Леви [18], которое выражает собой необходимое условие устойчивости явного численного решения и задается формулой:

$$\frac{C\Delta t}{\Delta x} < 0.1 \quad , \tag{1}$$

где C – скорость распространения волны; Δt – шаг дискретизации по времени; Δx – шаг дискретизации по расстоянию (максимальный размер конечных элементов).

Между тем, для получения точных результатов моделирования, необходимо учитывать условие соотношения размера конечных элементов к длине волны, которое должно составлять не менее одной пятой. Таким образом, в любой модели, содержащей распространение акустических волн, с учётом всех вышеизложенных условий, известной частоты и скорости распространения волны, должно выполняться следующее неравенство:

$$\frac{C}{5f} > \Delta x > \frac{C}{50f} > C\Delta t \quad . \tag{2}$$

Как правило, при моделировании возбуждения акустической волны в качестве зондирующего импульса используется форма импульса в виде окна Хэннинга с пятью [6, 7, 9–11] и реже другим количеством [12, 14, 16] периодов в импульсе.

Для создания касательных или нормальных напряжений при возбуждении крутильной, продольной или поперечной волны используется условие *Boundary Load*, при этом для того, чтобы получить форму импульса в виде экспоненциально затухающей синусоиды, как форму ударного зондирующего импульса, необходимо в качестве формы прикладываемой силы взять дифференциал по времени от формы импульса. С использованием данного подхода при форме импульса (рис. 1, а), описываемой формулой:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t) e^{-(\beta t)^2}, \qquad (3)$$

дифференциал по времени выглядит следующим образом (рис. 1, б):

$$F(t) = F_0 e^{-(\beta t)^2} (\omega \cos(\omega t) - 2\beta \sin(\omega t)), \qquad (4)$$

где U_0 – амплитуда смещений; F_0 – амплитуда силы; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; β – коэффициента затухания.



Рис. 1. Примеры форм импульса упругих смещений акустической волны (а) и силы, прилагаемой к поверхности объекта контроля (б), на частоте 20 кГц

Другим важным условием является наличие области идеально согласованного слоя (*Perfectly Matched Layer*, *PML*) на концах модели, позволяющей учесть распространение волны в бесконечность, ограничив тем самым область расчётов. Протяжённость данной области должна составлять более одной длины волны, распространение которой моделируется в программе. Например, на частоте 50 кГц для крутильной волны эта область должна быть не менее 65 мм. Начало области *PML* выбирается исходя из размеров интересующей области, в которой моделируется распространение волны. В общем случае расстояние до данной области можно определить соотношением, сопоставив его с линейными размерами модели и длиной волны.

Акустическое поле преобразователя зависит от многих параметров, в том числе рабочей частоты, апертуры, размера единичного элемента для фазированной решетки, расстояния между ними, количества элементов, расстояния между преобразователем (фазированной решеткой) и объектом контроля.

Особенности моделирования распространения акустических волн в прутках

Для исследования акустического поля проходного ЭМА преобразователя поперечных волн была разработана трехмерная модель (рис. 2, а). Согласно принципу работы такого преобразователя, ультразвуковая волна возбуждается с поверхности прутка, расположенной непосредственно под катушкой индуктивности. При моделировании для задания начальных смещений с помощью условия *Boundary load* к участку поверхности прикладывается сила F(t) (4). Под действием силы F(t) на поверхности прутка возникают упругие смещения U(t) (3), вызывающие появление акустической волны, которая распространяется в радиальных направлениях по сечению, многократно отражаясь от противоположных границ прутка.



Рис. 2. Разработанная трехмерная модель (а), распределение смещений в акустической волне (б)

В результате моделирования был получен фронт распространения акустической волны в трехмерном пространстве (рис. 2, б). В радиальной плоскости сечения фронт волны имеет круглую форму, при этом в осевой плоскости сечения его форма близка к форме фронта плоской волны. Таким образом, в прутке формируется поперечная акустическая волна с цилиндрическим фронтом распространения.

Для сокращения времени вычисления, длина прутка была принята равной 20 мм, при этом для имитации прутка бесконечной длины, граничные условия на торцах были сформированы с помощью функции *PML*. Основные параметры разработанной модели представлены в табл. 1.

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Плотность	ρ	7810	кг/м ³
Модуль Юнга	E	210×10^{9}	Па
Коэффициент Пуассона	μ	0,3	-
Амплитуда силы	F_0	10000	Н
Радиус объекта	R	10	ММ
Частота колебаний	f	3	ΜΓц
Скорость УЗ волны в материале	С	3250	м/с

Табл. 1. Основные параметры разработанной модели

При приближении волны к центру прутка наблюдается увеличение амплитуды смещений, а в центре прутка происходит фокусировка акустических колебаний с локальным увеличением амплитуды практически в 10 раз, по сравнению с амплитудой волны на поверхности. Разработанная модель также позволяет построить серию многократных отражений (рис. 3, а), которая имеет значительные сходства с реальной осциллограммой, получаемой при контроле проходным ЭМА преобразователем (рис. 3, б). Различия между осциллограммами могут быть вызваны низкой точностью расчета, связанной с ограничениями, вызванными низкой мощностью вычислительного оборудования.



Рис. 3. Смоделированная (а) и реальная (б) осциллограммы многократных отражений

В результате моделирования распространения акустических волн в прутках можно выделить следующие основные особенности построения модели:

– поскольку акустические волны распространяются по сечению, нет необходимости в моделировании большого отрезка прутка, однако для исключения влияния отражений волны от торцов, необходимо использовать условие *PML*;

– участок поверхности, к которому прикладывается сила F(t), удобнее описывать функцией, зависящей от координаты Z по оси прутка, при этом нет необходимости в разбиении прутка на отдельные участки.

Особенности моделирования фокусировки акустических волн в трубах

Трёхмерные модели распространения акустической волны в трубе крайне сложны, для их решения требуются большие вычислительные мощности. Модель в общем случае упрощается из трёхмерной в двухмерную, при этом на края модели накладываются дополнительные граничные условия в виде периодического условия *Periodic Condition*. Данное условие позволяет перенести упругие колебания с одной грани на другую, тем самым двухмерная модель представляется в виде развёртки трубы с двумя продольными швами вдоль осевого направления трубы.

Модель развёртки трубы с сеткой конечных элементов представлена на рис. 4. С использованием условия из формулы (2) для трубы диаметром 530 мм при фокусировке на расстоянии 3 м с частотой возбуждения крутильной волны 20 кГц количество конечных элементов составило 22978.



Рис. 4. Модель развёртки трубы с конечно-элементной сеткой

Параметры модели приведены в табл. 2. Поскольку изготовить универсальные преобразователи с переменным радиусом кривизны протектора очень сложно, то при моделировании считаем, что контакт преобразователя с цилиндрической поверхностью трубы осуществляется по линии, направленной вдоль оси трубы. Длина данной линии ограничивается продольными размерами преобразователя, в нашем случае она составляет 20 мм.

Ta	абл. 2.	Основные	параметры	модели	распрос	транения	крутильной	волны	В
трубе									

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Диаметр трубы	D	530	MM
Периметр трубы	$P, P = \pi D$	1,665	М
Расстояние до точки фокуса	R_{f}	3000	MM
Длина трубы	$L, L = 1,7R_f$	5,1	М
Толщина стенки трубы	Н	12	ММ
Количество элементов решётки	N	32	-
Частота колебаний	f	20	кГц
Период колебаний	T, T = 1/f	$5 \cdot 10^{-5}$	с
Амплитуда колебаний	A	10000	Н
Плотность	ρ	7810	к г/м ³
Модуль Юнга	E	212	ГПа
Коэффициент Пуассона	μ	0,291	-
Скорость крутильной волны	C_T ,	3242,4	м/с
	$C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$		
Протяжённость области PML	$L_{\text{PML}}, L_{\text{PML}} = 2 \cdot C_T / f$	324,24	ММ

Для получения фокусировки акустических волн на заданном расстоянии используется следующая формула в условии *Boundary Load*:

$$F_{y} = f\left(t - \frac{\sqrt{R_{f}^{2} + (\pi R)^{2}} - \sqrt{R_{f}^{2} + (\pi R - y)^{2}}}{C}\right),$$
(5)

где F_y – сила, направленная по оси Y; f(t) – функция силы, определяемая по формуле (4); t – время; R_f – расстояние до точки фокуса; R – радиус трубы; y – координата по оси Y.

Поскольку условие *Boundary Load* применено на гранях, направленных вдоль оси X, отстоящих друг от друга на одинаковом расстоянии по оси Y, то данное условие выполняется дискретно с наступлением опредёленного момента времени t. Таким образом, с использованием формулы (5) и условия *Boundary Load* реализованы временные задержки в фазированной решётке.

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Помимо крутильной волны, а с учётом переноса на двухмерную модель её можно считать поперечной волной с горизонтальной поляризацией, возбуждается продольная и изгибная волна. Поскольку временные задержки настроены на фокусировку крутильных волн, прочие возбуждаемые моды не оказывают существенного влияния на окончательный результат.



Рис. 5. Картины распределения смещений в момент формирования фронта волны (а) и момент схождения поперечных волн горизонтальной поляризации в точке акустического фокуса (б)

На рис. 6 приведена иллюстрация распределения акустического поля. Распределение акустического поля строится как максимальные смещения в волне за указанный промежуток времени при помощи функции *timemax*($t_{\text{нач}}$, $t_{\text{кон}}$, f(t)). В исследуемой модели время ограниченно началом возбуждения волны $t_{\text{нач}}$ и полным прохождением волны в область *PML* $t_{\text{кон}}$, при этом в качестве анализируемой функции f(t) используется функция абсолютных смещений.



Рис. 6. Картина пространственного распределения акустического поля

Как следует из теории, фокусное пятно формируется на расстоянии, не соответствующем геометрическому фокусу. При фокусировке на больших расстояниях центр фокусного пятна находится ближе к области установки фазированной решётки по отношению к геометрическому фокусу. Фокусное пятно можно охарактеризовать с помощью трёх величин: протяжённости вдоль оси трубы, радиуса по периметру трубы и уровня выделения фокусного пятна относительно его максимума. На рис. 6 приведено фокусное пятно по уровню 6 дБ (ослабление амплитуды волны в 2 раза) при геометрическом фокусе равном 3 м.

Из приведённых результатов основными особенностями моделирования фокусировки акустических волн в трубах можно считать следующие положения:

 – для упрощения модели и ускорения процессов расчёта необходимо переходить на двухмерную развёртку трубы, при этом использовать дополнительное граничное условие в виде условия периодичности для учёта переноса смещений с одной грани на другую;

– для ограничения модели и исключения отражений от противоположной грани (торца трубы) необходимо добавлять область *PML*, размеры которой должны быть не менее одной длины волны;

 – для автоматизации определения временных задержек в фазированной решётке можно использовать формулу задающей силу воздействия на поверхность трубы.

Заключение

Таким образом, по результатам моделирования акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решёток в трубах, прутках можно сделать следующие выводы:

– разработана модель, позволяющая исследовать влияние форм, размеров, местоположения дефектов в прутке, а также геометрических параметров прутков, в частности, эллиптичности, на формирование эхограммы;

– в моделировании акустических полей важную роль играет критерий Куранта–Фридрихса–Леви, согласно которому выбирается шаг дискретизации по расстоянию (максимальный размер конечных элементов) и времени;

– на формирование акустического поля в трубах и прутках влияет ряд параметров, наиболее существенными из которых являются рабочая частота, размер апертуры, количество элементов (витков) в катушке индуктивности или фазированной решётке, расстояние между ними, зазор между преобразователем и объектом контроля;

 – упрощение из трёхмерной в двухмерную модель при моделировании акустического поля фазированной решётки в трубе даёт возможность исследовать фокусировку акустических волн с меньшими временными затратами;

– для ограничения распространения акустических волн в бесконечность необходимо использовать область Perfectly Matched Layer.

Результаты исследований могут быть использованы при моделировании взаимодействия акустических волн с дефектами, формирования акустического поля прутка при его эллиптичности, фокусировки звука в трубах под углом к плоскости апертуры.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00051).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров, К. В. Моделирование систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей для контроля неферромагнитных объектов / К. В. Петров, О. В. Муравьева // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. матер. III Всероссийской науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. – 2014. – С. 136–140.

2. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитноакустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева [и др.] // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 2–9.

3. **Мышкин, Ю. В.** Влияние конструктивных параметров фазированных преобразователей на распределение поперечных волн горизонтальной поляризации при их фокусировке в трубопроводах большого диаметра / Ю. В. Мышкин, О. В. Муравьева, С. В. Леньков // Приборостроение в XXI веке – 2014. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всероссийской науч.техн. конф. с междунар. участием. – Ижевск : ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2014. – С. 233–237.

4. **Муравьева, О. В.** Эффективность фокусировки волн горизонтальной поляризации в трубопроводах большого диаметра / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, Ю. В. Мышкин // Сварка и диагностика : сб. докл. междунар. форума. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 272–277

5. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О. В. Муравьева [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 7. – С. 17–23.

6. Evaluating an SH wave EMAT system for pipeline screening and extending into quantitative defect measurements / M. Clough [et al.] // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2016. – T. 1706. – N_{2} . 1. – P. 160001.

7. Parametric Study of Defect Detection in Pipes with Bend Using Guided Ultrasonic Waves / J.J. Tan [et al.] // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. – T. 71. – P. 02003.

8. Shear horizontal feature guided ultrasonic waves in plate structures with 90 transverse bends / X. Yu [et al.] // Ultrasonics. – 2016. – T. 65. – P. 370–379.

9. Leinov, E. Investigation of guided wave propagation in pipes fully and partially embedded in concrete / E. Leinov E., M. J. S. Lowe, P. Cawley // The Journal of the Acoustical Society of America. $-2016. - T. 140. - N_{\odot}. 6. - P. 4528-4539.$

10. **Clough, M.** Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound / M. Clough, M. Fleming, S. Dixon // NDT & E International. – 2017. – T. 86. – P. 20–27.

11. Longitudinal mode magnetostrictive patch transducer array employing a multi-splitting meander coil for pipe inspection / Z. Liu [et al.] // NDT & E International. – 2016. – T. 79. – P. 30–37.

12. Xu, J. Research on the Lift-off Effect of Receiving Longitudinal Mode Guided Waves in Pipes Based on the Villari Effect / J. Xu, Y. Sun, J. Zhou // Sensors. – 2016. – T. 16. – N_{2} . 9. – P. 1529.

13. Investigations of mechanical guided waves propagation in pipes repaired locally by composite patches / S. Yaacoubi [et al.] // ECCOMAS Congress. – 2016.

14. **Zuo, P.** Numerical studies of nonlinear ultrasonic guided waves in uniform waveguides with arbitrary cross sections / P. Zuo P., Y. Zhou, Z. Fan // AIP Advances. $-2016. - T. 6. - N_{\odot}. 7. - P. 075207.$

15. **Belanger, P.** Development of a low frequency omnidirectional piezoelectric shear horizontal wave transducer / P. Belanger, G. Boivin // Smart Materials and Structures. $-2016. - T. 25. - N_{\odot}. 4. - P. 045024.$

16. **Zuo, P.** Numerical and experimental investigation of nonlinear ultrasonic Lamb waves at low frequency / P. Zuo, Y. Zhou, Z. Fan // Applied Physics Letters. – 2016. – T. 109. – No. 2. – P. 021902.

17. A theoretical study of the fundamental torsional wave in buried pipes for pipeline condition assessment and monitoring / J.M. Muggleton [et al.] // Journal of Sound and Vibration. -2016. - T. 374. - P. 155-171.

18. **Курант, Р.** О разностных уравнениях математической физики / Р. Курант, К. О. Фридрихс, Г. Леви // Успехи математических наук. – 1941. – №. 8. – С. 125–160.

УДК 620.130 РАСЧЕТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ

Белорусский национальный технический университет Минск, Беларусь

UDC 620.130 CALCULATIONS OF DISTRIBUTIONS OF IMPULSE MAGNETIC FIELDS OF SECONDARY SOURCES V. V. PAVLYUCHENKO, E. S. DOROSHEVICH

Аннотация

Изложены результаты расчетов пространственных распределений электрического напряжения U(x), снимаемого с преобразователя магнитного поля, при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля (*HI*). Гистерезисные ветви остаточных магнитных полей магнитного носителя представлены в виде функций арктангенса. Графики рассчитаны с помощью программного языка Delphi. Разработанные методы позволяют повысить точность контроля толщины электропроводящих объектов, неоднородности распределения удельной электропроводности σ , а также параметров дефектов сплошности.

Ключевые слова:

напряженность магнитного поля, удельная электропроводность, магнитный носитель, арктангенс, гистерезисная интерференция.

Abstract

The results of calculations of the spatial distributions of the electric voltage U (x), taken from the magnetic field transducer, are presented for the hysteretic interference of the pulsed magnetic field (HI). The hysteretic branches of the residual magnetic fields of the magnetic carrier are represented as arctangent functions. The graphs are calculated using the Delphi programming language. The developed methods make it possible to increase the accuracy of controlling the thickness of electrically conductive objects, the inhomogeneity of the distribution of the specific electric conductivity, and also the parameters of the defects of continuity.

Key words:

magnetic field intensity, specific electrical conductivity, magnetic carrier, arctangent, hysteresis interference.

В настоящее время ведутся интенсивные работы по развитию магнитографического метода контроля и магнитных методов контроля с визуализацией магнитных полей [1–6]. Следует отметить также теоретические и экспериментальные работы авторов [7–9] по развитию предложенных ими методов контроля с использованием гистерезисной интерференции магнитного поля. При этом измерение напряженности магнитного поля, инфор-

мацию с которых считывали индукционной магнитной головкой. Воздействовали на датчик с контролируемым объектом импульсами магнитного поля с убывающей амплитудой и чередующейся полярностью. В результате получали временные зависимости электрического напряжения U(t), по которым находили гистерезисные распределения остаточных магнитных полей, соответствующие распределениям свойств объекта. Свойства объекта определяли путем сравнения распределений U(t) или соответствующих им распределений U(x), где x – координата вдоль линии замера.

Разработанные методы гистерезисной интерференции могут быть использованы с магнитными носителями, обладающими разными гистерезисными свойствами. Произведем расчеты распределений полей для магнитного носителя с ветвями гистерезиса, описываемыми зависимостями в виде функции арктангенс. Заметим, что указанные вычисления можно производить как с ветвями, образующими петли гистерезиса, так и с отдельно взятыми гистерезисными зависимостями. Расчеты и построения графиков произведены с помощью программного языка Delphi.

Пример распределения воздействующего магнитного поля показан на рис. 1.



Рис. 1. Зависимость величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля от расстояния *x* до проекции оси линейного излучателя

Зависимость величины тангенциальной составляющей H_{τ} напряженности магнитного поля, обозначенной в расчетах через y1, от расстояния x до оси проекции индуктора на плоскость магнитного носителя определяется по формуле:

$$y_1 = -12.8/(x^2+0.64),$$
 (1)

где *х* измеряется в *cm*, а *y1* – в *А/сm*. Линейный индуктор находится на расстоянии 0,8 *cm* от магнитного носителя параллельно его плоскости.

Пусть разность ветвей гистерезиса остаточных магнитных полей, записанных на магнитном носителе и выраженных в виде зависимостей

электрического напряжения *U* от напряженности магнитного поля *H*, определяется по формуле:

$$U_l = \operatorname{arctg}(y^1 + 19) - \operatorname{arctg}(y^1 + 17).$$
 (2)

График функции (2) показан на рис.2.



Рис. 2. Рассчитанная по формуле (2) зависимость U(x)

Расчетная гистерезисная интерференционная картина для U(x), показанная на рис.2, получена при воздействии на магнитный носитель импульсами магнитного поля величиной (y¹+19) и (y¹+17). После этого воздействуем на магнитный носитель двумя импульсами магнитного поля величиной (y¹+15) и (y¹+13) в соответствии с формулой:

$$U_2 = \operatorname{arctg}(y^1+19) - \operatorname{arctg}(y^1+17) + \operatorname{arctg}(y^1+15) - \operatorname{arctg}(y^1+13)$$
 (3)

и получаем график функции (3) на рис. 3.



Рис. 3. Рассчитанная по формуле (3) гистерезисная интерференционная картина U(x)

Воздействуя на датчик с объектом шестью и восемью импульсами, получаем соответственно графики функции U_3 и U_4 , изображенные на рис. 4 и рис.5.



Рис. 4. Гистерезисная интерференционная картина U(x) рассчитанная по формуле (4)

```
U_{4} = \arctan(y^{1}+19) - \arctan(y^{1}+17) + \arctan(y^{1}+15) - \arctan(y^{1}+13) + \arctan(y^{1}+10) - \arctan(y^{1}+9) + \arctan(y^{1}+6) - \arctan(y^{1}+4.6) + \arctan(y^{1}+3.2) - \arctan(y^{1}+2)
(5)
```



х, ст

Рис. 5. Гистерезисная интерференционная картина U(x), рассчитанная по формуле (5)

После этого строим функцию, зеркальную функции U_4 и получаем их совместное изображение, показанное на рис.6.





На основании изображенных на рис. 6 графиков формируем оптическое изображение магнитного поля (на рисунках не показано). При этом вводим в соответствие величине напряженности магнитного поля уровень серого (уровень цветности) и «закрашиваем» полученные замкнутые фигуры в соответствии с указанными уровнями сигнала. Свойства объекта находим путем сравнения полученных изображений контролируемого объекта и эталонных изображений.

Увеличим напряженность магнитного поля второго импульса, заменив в (5) (функция U_4) аргумент (y¹+17) на аргумент (y¹+18). Это увеличение может быть вызвано дополнительным (вторичным) полем, возникшим в момент действия второго импульса, например, полем структурной неоднородности. В результате получаем график функции U_5 , изображенный на рис. 7.



Рис. 7. Графики функции U_5 *х. ст*

Сравнение графиков на рис. 5 и 7 показывает, что указанному увеличению *H* соответствует уменьшение главного максимума

интерференционной картины при x=0 в два раза (1,3 mV и 0,7 mV). Точность измерений возросла в несколько раз. Изменения в распределении сигнала, снимаемого с магнитной головки, вызванные действием дополнительного магнитного поля, показаны на рис.8, где закрашенная область соответствует разности функций U_4 и U_5 .



х. ст

Рис. 8. Графики функции U_4 и U_5

Выводы

Таким образом, приведенные результаты расчетов распределений электрического напряжения U(x), снимаемого с преобразователя магнитного поля по линии замера, при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля (*HI*). Свидетельствуют о том, что использование гистерезисных свойств остаточных магнитных полей магнитного носителя, описываемые зависимостями в виде арктангенса, позволяют повысить точность контроля свойств электропроводящих объектов. Разработанные методики могут быть использованы для расчета любых процессов, свойства которых выражены зависимостями в виде арктангенса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Павагин, В. А.** Идентификация кольцевых сварных швов на магнитограммах дефектоскопов поперечного намагничивания основанию / В. А. Павагин, А. Ф.Матвиенко // Дефектоскопия. – 2009. – № 8. – С. 13–18.

2. **Новиков, В. А.** Магнитографический контроль объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель. Схемы намагничивания / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С. 30–35.

3. Грузинцев, А. А. Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. І. Исходная модель для расчета поля магнитной ленты, намагниченной от проводника с током / А. А. Грузинцев, С. П. Михайлов // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 22–30.

4. Горкунов, Э. С. Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивости к внешним воздействиям. К вопросу о «Методе магнитной памяти» // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 3–21.

5. **Новиков, В. А.** Измерение напряженности магнитного поля у поверхности ферромагнитного объекта / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 5. – С. 25–28.

6. **Новиков, В. А.** Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки "Flux-detector" / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5. – С. 18–22.

7. **Павлюченко, В. В.** Одним импульсом / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 174 с.

8. **Павлюченко, В. В.** Использование магнитного гистерезиса при контроле объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2013. – № 6. – С. 53–68.

9. Павлюченко, В. В. Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич, В. Л. Пивоваров // Дефектоскопия. – 2015. – № 1. – С. 11–20.

E-mail: es_doroshevich@mail.ru

УДК 006

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ВЫБОРА ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИЁМОЧНОГО КОНТРОЛЯ

3. Ю. ТРЕТЬЯК

УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь

UDC 006 APPLICATION OF A COMPUTATIONAL EXPERIMENT TO SELECT PERMISSIBLE ERROR OF MEASURING ACCEPTANCE INSPECTION Z. Y. TRETYAK

Аннотация

Рассматриваются цели и порядок проведения вычислительного эксперимента по выбору допустимой погрешности измерительного приёмочного контроля. Получены значения рисков для различных комбинаций распределений контролируемого параметра и неопределенности измерений.

Ключевые слова:

допустимая погрешность измерений, измерительный приемочный контроль, риск изготовителя, риск потребителя.

Abstract

The purposes and the procedure of the computational experiment on the selecting of the permissible error of the measuring acceptance inspection are considered. Risk values for various combinations of distributions of the controlled parameter and measurement uncertainty are obtained.

Key words:

permissible measurement error, acceptance inspection, producer's risk, consumer's risk.

Одним из сложнейших и недостаточно исследованных вопросов метрологии, на сегодняшний день, является выбор допустимых погрешностей измерений при решении измерительных задач. Допустимое значение погрешности измерений фактически представляет собой критерий пренебрежимой малости погрешности измерений: если реализуемая при измерениях погрешность не превышает этого значения, результат измерений признают действительным значением измеряемой физической величины. Получение действительного значения физической величины есть главная цель любого измерения, поскольку в противном случае все ресурсы следует считать потраченными напрасно.

В метрологической литературе достаточно часто встречаются рекомендации по выбору допустимых погрешностей измерений при решении

задач измерений физических величин с установленной исходной неопределённостью [1–3]. К таким задачам можно отнести измерения при приёмочном контроле параметра с двухпредельным ограничением (параметр с допуском, погрешность поверяемого средства измерений и др.). Для их решения в метрологии широко используют соотношение:

$$[\Delta] = (1/5...1/3)A, \tag{1}$$

где А – допустимая неопределенность измеряемого параметра (допуск контролируемого параметра, погрешность измерения в ходе приемочного контроля, основная погрешность поверяемого СИ, минимальная ступень изменения номинального значения параметра) [3]. Такое соотношение предложено в ГОСТ 8.051 «Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм».

Из (1) можно получить критерий пренебрежимой малости погрешности измерений

$$[\Delta] \le A/3, \tag{2}$$

который можно использовать для решения подобных задач измерений физических величин. Предложенное соотношение, традиционно применяемое для измерительного приемочного контроля параметра с назначенным допуском T,

$$([\Delta] \le T/3), \tag{3}$$

и, как показал многолетний опыт его применения, является вполне удовлетворительным при следующих условиях:

 – распределение контролируемых параметров объекта серийного производства (параметры партии объектов) имеют случайный характер;

– в результатах измерений доминирует случайная составляющая по-

На соотношениях (1, 2 и 3) построены нормативные документы, включая ГОСТ 8.051 и стандарты на поверку средств измерений. Однако подробное рассмотрение ситуации при несоответствии реальных условий измерений желаемым в метрологической литературе отсутствует. В ГОСТ 8.051 в качестве «страховки» оговаривается, что случайная погрешность измерений, границы которой принимают равными 2σ , не должна превышать 0,6 допустимой погрешности измерений. Тут в неявном виде заложено допущение о нормальном распределении случайной погрешности измерений, доверительные границы которой устанавливаются с вероятностью P = 0,95.

Из проведенного анализа следует, что необходимо провести исследование влияния на результаты контроля постоянных и переменных систематических составляющих как контролируемых величин, так и результатов измерений. Дополнительно при контроле объектов в ходе серийного или массового производства (измерения множества номинально одинаковых физических величин) необходимо учитывать влияние на погрешности измерений и ошибки измерительного контроля (разбраковки объектов) постоянных и переменных систематических составляющих, характеризующих технологический процесс получения измеряемых физических величин. На рис. 1 представлена схема способа определения вероятности неправильного принятия бракованного объекта. Чтобы принять в качестве годного бракованный объект, необходимо, чтобы в тот момент, когда контролируется объект с отклонениями, выходящими за границу поля допуска на значение *x*, погрешность измерения проявилась с обратным знаком и имела значение, большее чем это отклонение.



Рис. 1. Определение вероятности неправильного принятия объекта по контролируемому параметру из-за погрешности измерений

Необходимо также учитывать, что случайное распределение измеряемых параметров, а также распределение случайных погрешностей измерений этих параметров не всегда подчиняются закону нормального распределения случайных величин. Вид функции распределения контролируемого параметра, а также значений её оценок – математического ожидания и дисперсии обуславливаются характером производства контролируемых изделий, точностью и стабильностью технологических операций и т.п. Поскольку нас интересуют разнообразные комбинации наложений случайных распределений величин, характеризующих технологический процесс и процесс измерений на систематические изменения (различия) параметров технологических процессов и процессов измерений, становится очевидным огромный объём намечаемых исследований и необходимых для него технических и временных ресурсов. Аналогичные рассуждения можно привести и в отношении исследований влияния на погрешности измерений постоянных и переменных систематических составляющих, присущих методике выполнения измерений, применяемой для приёмочного измерительного контроля. Адекватной заменой описанных экспериментальных исследований может быть вычислительный эксперимент.

Для оптимизации выбора допустимой погрешности измерений при измерительном контроле в ходе серийного производства были проведены специальные экспериментальные исследования. Исследования включали ряд специально подготовленных вычислительных экспериментов и были направлены на изучение зависимости показателей достоверности измерительного контроля от комбинации законов распределения технологического рассеяния контролируемого параметра и неопределенности измерений, влияния на результаты разбраковки постоянных и переменных систематических составляющих, характеризующих технологический процесс получения измеряемых физических величин.

Для проведения вычислительных экспериментов в обозначенной области был специально разработан ряд программных продуктов, включая генераторы случайных чисел, распределенных по определенному закону в заданном диапазоне, программы расчета рисков потребителя и изготовителя, расчета поля рассеяния контролируемого параметра при заданной доверительной вероятности и др.

Целью первой группы проведенных вычислительных экспериментов было исследование влияния вида функции распределения неопределенности измерений и её параметров на вероятности ошибок измерительного контроля (риски изготовителя и потребителя), при контроле объектов в ходе серийного или массового производства, т. е. измерения множества номинально одинаковых физических величин.

Исследования проводились по следующей схеме.

1. Выбор вида функции распределения технологического рассеяния контролируемого параметра.

2. Назначение уровня доверительной вероятности *P*.

3. Определение ширины поля практического рассеяния контролируемого параметра с назначенным уровнем доверительной вероятности ω_p .

4. Выбор значения неопределенности измерений. Рассмотрены значения неопределенности измерений, пропорциональные определённой части допуска Т. Вычислительный эксперимент проводился для значений $\Delta_1 = T/3$, $\Delta_2 = T/5$.

5. Выбор вида функции распределения неопределенности измерений.

6. Определение рисков изготовителя и потребителя для различных комбинаций законов распределения технологического рассеяния контролируемого параметра и неопределенности измерений.

7. Анализ полученных величин вероятностей ошибок измерительного контроля.

8. Выбор значений неопределенности измерений, удовлетворяющих требуемому уровню точности.

Для математического описания модели были выбраны средства вероятностного анализа измерительного контроля. Затем были получены количественные выражения для рисков изготовителя и потребителя через точностные характеристики методик выполнения измерений (МВИ), используемых для измерительного контроля, а также с учетом возможных распределений рассеяния параметров изделий, поступающих на контроль и выбранного алгоритма контроля (правила принятия решения о годности или негодности контролируемого изделия).
Формулы для расчета средних рисков изготовителя и потребителя предложены Рубичевым и Фрумкиным [4]:

$$R_{\text{norp}} = 1 - \frac{\int\limits_{-\infty}^{USL} \int\limits_{SL} k(z)q(y-z)dydz}{\int\limits_{-\infty}^{+\infty} \int\limits_{LSL} k(z)q(y-z)dydz}, \qquad R_{\text{H3T}} = 1 - \frac{\int\limits_{LSL}^{USL} \int\limits_{LSL} k(z)q(y-z)dydz}{\int\limits_{LSL} k(z)dz}$$
(4)

где USL – наибольшее предельное значение контролируемого параметра; LSL – наименьшее предельное значение контролируемого параметра; k – плотность вероятности контролируемого параметра; z – значение контролируемого параметра; q – плотность вероятности неопределенности измерения; y – конкретное значение результата измерения для данного экземпляра изделия, для которого рассчитывается индивидуальный риск.

Вычислительный эксперимент производился для нормального, равновероятного, треугольного и трапециевидного распределений технологического рассеяния контролируемого параметра. При выборе для аппроксимаций трапециевидных распределений в расчётах параметров неопределенности измерений использовались распределения с отношением оснований (верхнего к нижнему) $\beta = 1/2$; 1/3; 2/3.

В качестве распределений неопределенности измерений выбраны: нормальное (Гаусса), равновероятное (прямоугольное), треугольное (Симпсона), трапециевидное и U-образное (арксинуса).

Поле практического рассеяния контролируемого параметра принималось равным полю допуска $\omega_p = T$. Ширина поля практического рассеяния контролируемого параметра, при заданной доверительной вероятности, рассчитана для различных видов распределения контролируемого параметра.

Полученные значения представлены в табл. 1.

Табл. 1. Полученные значения полуширины поля рассеяния контролируемого параметра

Vropeur de	Полуширина поля рассеяния контролируемого параметра						
уровень до- верительной вероятности	равнове- роятное	нор- мальное	треуголь- ное	трапециевидное с отношением оснований			
				$\beta = 2/3$	$\beta = 1/2$	$\beta = 1/3$	
$P \approx 1$	1,732	3,000	2,449	2,037	2,191	2,324	
P≈ 0,99	1,713	2,580	2,210	1,890	2,010	2,110	
$P \approx 0,95$	1,647	1,970	1,905	1,700	1,767	1,835	
$P \approx 0,90$	1,557	1,650	1,676	1,558	1,593	1,634	

В качестве примера приведены результаты вычислительного эксперимента для среднего риска изготовителя при $\Delta_1 = T/3$ (табл. 2).

	Риск изготовителя R _{изг} , % при распределении контролируемого параметра							
Распределение неопре- деленности	равнове- нор-		тре-	трапециевидное с отношением оснований				
	роятное	мальное	угольное	$\beta = 2/3$	$\beta = 1/2$	$\beta = 1/3$		
P = 0,90								
Нормальное	4,43	1,83	2,57	4,06	3,31	2,92		
Треугольное	5,56	2,60	3,15	4,92	3,99	3,47		
Трапециевидное $\beta = 1/3$	6,02	2,84	3,42	5,01	4,34	3,77		
Трапециевидное $\beta = 1/2$	6,48	3,08	3,57	5,39	4,53	3,93		
Трапециевидное $\beta = 2/3$	7,04	3,40	4,07	5,80	5,18	4,50		
Равновероятное	8,33	4,19	4,96	7,65	6,34	5,49		
U-образное (арксинуса)	10,61	5,60	6,54	10,03	8,32	7,25		
P = 0,95								
Нормальное	4,43	1,40	2,16	3,21	2,77	2,41		
Треугольное	5,56	1,83	2,61	4,10	3,28	2,87		
Трапециевидное $\beta = 1/3$	6,02	2,00	2,84	4,47	3,58	3,13		
Трапециевидное $\beta = 1/2$	6,48	2,18	3,09	4,88	3,90	3,41		
Трапециевидное $\beta = 2/3$	7,04	2,42	3,41	5,39	4,30	3,76		
Равновероятное	8,33	3,05	4,21	6,65	5,34	4,65		
U-образное (арксинуса)	10,61	4,16	5,63	8,87	7,18	6,22		
P = 0,99								
Нормальное	4,43	0,55	1,45	2,26	1,81	1,62		
Треугольное	5,56	0,75	1,75	2,80	2,18	1,92		
Трапециевидное $\beta = 1/3$	6,02	0,83	1,92	3,07	2,39	2,11		
Трапециевидное $\beta = 1/2$	6,48	0,91	2,01	3,39	2,63	2,31		
Трапециевидное $\beta = 2/3$	7,04	1,03	2,95	3,43	2,95	2,59		
Равновероятное	8,33	1,36	3,01	4,91	3,80	3,32		
U-образное (арксинуса)	10,61	1,97	4,17	6,89	5,31	4,61		
P = 1 (для нормального распределения P = 0,9973)								
Нормальное	4,43	0,24	0,87	1,35	1,06	0,94		
Треугольное	5,56	0,35	0,93	1,67	1,23	1,04		
Трапециевидное $\beta = 1/3$	6,02	0,38	1,03	1,85	1,37	1,16		
Трапециевидное $\beta = 1/2$	6,48	0,43	1,16	2,08	1,54	1,30		
Трапециевидное $\beta = \frac{1}{2}$	7,04	0,49	1,34	2,41	1,78	1,51		
Равновероятное	8,33	0,68	1,85	3,33	2,47	2,08		
U-образное (арксинуса)	10,61	1,03	2,77	5,01	3,70	3,12		

Табл. 2. Результаты расчёта среднего риска изготовителя для различных распределений контролируемого параметра при $\Delta_1 = T/3$

Гистограммы рисков изготовителя при P = 0,95 для заданных комбинаций распределений контролируемого параметра и неопределённости измерений представлены на рис. 2.



Рис. 2. Гистограммы рисков изготовителя для заданных распределений контролируемого параметра при различных распределениях неопределённости измерений для P = 0,95: $a - \Delta_2 = T/5$; $\delta - \Delta_1 = T/3$; 1 – нормальное; 2 – треугольное; 3 – трапециевидное с b = 1/3; 4 – трапециевидное с b = 1/2; 5 – трапециевидное с b = 2/3; 6 – равновероятное; 7 – U-образное (арксинуса)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков, Н. Н. Метрологическое обеспечение в машиностроении: учеб. для высш. учебных заведений / Н. Н. Марков. – М. : Изд-во «Станкин», 1995. – 468 с.

2. Установление показателей качества продукции и технологических параметров и норм точности их измерения / Под общ. ред. проф. А. А. Бегунова. – СПб. : ГОУВПО СПбГТУРП, 2008. – 85 с.

3. Цитович, Б. В. Выбор методик выполнения измерений для исследования точности технологических процессов / Б. В. Цитович // Наука и технологии на рубеже XXI века : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Минск : Технопринт. – 2000. – С. 499–504.

4. **Рубичев, Н. А.** Достоверность допускового контроля качества / Н. А. Рубичев, В. Д. Фрумкин. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 172 с.

E-mail: tretzarina@ya.ru

УДК 621.385

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОД ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ

Е. Г. ЩУКИС, В. П. ЛУНИН, Е. А. КУЛИКОВА

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Москва, Россия

UDC 621.385

APPLICATION OF CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM TO HIGHLIGHT DEFECTS UNDER STRUCTURAL ELEMENTS E. G. SHCHUKIS, V. P. LUNIN, E. A. KULIKOVA

Аннотация

В статье отмечены трудности при анализе данных многочастотного вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов, обусловленные наличием множества мешающих факторов и шума. Предложен метод выделения сигналов от дефектов под конструктивными элементами на основе непрерывного вейвлет-преобразования.

Ключевые слова:

вейвлет-анализ, вихретоковый метод контроля, теплообменные трубки парогенератора.

Abstract

The paper describes the difficulties of steam generator heat exchanger tubes eddy-current testing data analysis due to noise levels and the presence of numerous interfering parameters. One of the main interfering parameters is structural elements. The paper considers continuous wavelet transform for reliable flaw isolation under structural elements.

Key words:

wavelet transform, eddy-current testing, eddy-current signals.

Одной из важнейших составляющих безопасной эксплуатации энергоблока атомных электрических станций (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) является работоспособность парогенераторов (ПГ). Парогенератор предназначен для отвода тепла от теплоносителя первого контура и генерации насыщенного пара.

Основным элементом, определяющим фактический срок службы парогенератора, являются теплообменные трубки (рис.1).

Анализ повреждений ТОТ парогенераторов на АЭС, изготовленных из аустенитной стали, выявил, что причинами выхода из строя ТОТ являются эксплуатационные коррозионные повреждения.



Рис. 1. Теплообменные трубки и дистанционирующая решетка

Наиболее эффективным методом оценки состояния теплообменных труб ПГ на данный момент является вихретоковый метод контроля (ВТК).

ВТК позволяет выявить не только сквозные дефекты, но и дефекты различной глубины и размеров, что позволяет превентивно заглушить трубы с дефектами, которые еще не пропускают теплоноситель из первого контура во второй, но могут развиться до сквозных [1]. Многочастотный ВТК ТОТ ПГ с использованием внутреннего проходного дифференциального преобразователя дает возможность проконтролировать трубы по всей длине, позволяет зафиксировать наличие дефекта, локализовать его и оценить глубину [2].

На российских АЭС многочастотный метод вихретокового контроля металла ТОТ ПГ применяется уже более 20 лет, но, несмотря на такой длительный срок, остаются проблемы с достоверностью получаемых результатов ВТК, связанных с субъективностью соответствующих экспертных решений. Одной из причин является сложность анализа эксплуатационных вихретоковых сигналов, обусловленная как наличием множества мешающих факторов, таких, например, как сигналы от ряда конструктивных элементов, так и влияние различного рода шумов.

Одним из основных мешающих факторов являются конструктивные элементы, а именно дистанционирующие решетки, под которыми часто возникают коррозионные дефекты. В данной работе представлен метод выделения сигналов от дефектов под дистанционирующими решетками (рис. 1).

Сигналы на выходе вихретокового преобразователя относятся к классу нестационарных сигналов, в котором основную информацию несут локальные особенности сигнала, соответствующие конструктивным элементам и/или дефектам ТОТ [3]. Сигналы такого рода требуют применения математического аппарата, который позволял бы анализировать и представлять локализованные одновременно в частотной и временной областях особенности сигнала. Поэтому для выявления и анализа локальных особенностей сигналов целесообразно применять вейвлет-анализ [4]. Непрерывное вейвлет-преобразование служит для определения вейвлет-спектра, т. е. набора коэффициентов {Ws(a,b)}, представляющих исследуемый сигнал в частотно-временной области.

Оно определяется следующим выражением:

$$W_{S}(a,b) = \left\langle S(x), \psi_{a,b}(x) \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(x) \cdot \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad , \tag{1}$$

где а – это масштабный коэффициент; b – параметр сдвига по оси х.

Вейвлет-преобразование используют в тех случаях, когда результат анализа исследуемого сигнала должен содержать не только простое перечисление его характерных частот (масштабов), но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты проявляют себя.

Выбор вейвлет-функции ψ осуществляется на основе подобия формы сигнала от дефекта и материнского вейвлета. Для анализа был применен вейвлет Гаусса.

$$\psi(x) = (-1)^n \frac{d^n}{dx^n} e^{\frac{-t^2}{2}}.$$
(2)

Был проведен анализ частотных свойств вейвлет-функций различных порядков и их разрешающей способности в зависимость от значения масштаба. В качестве примера, на рис. 2 показаны вейвлет-функции Гаусса 8-ого порядка при двух различных значениях масштаба, а=6 и а=20. Как видно из рис. 2, чем меньше значение масштаба, тем в более высокочастотной области находится спектр вейвлет-функции и больше значение параметра W-эффективной ширины спектра. Под эффективной шириной спектра понимают диапазон пространственных частот, в котором значения спектральной плотности мощности превышают половину ее максимального значения.



Рис. 2. Вейвлет Гаусса 8-ого порядка

На рис. 3 и 4 показан характер изменения эффективной ширины спектра вейвлет-функций Гаусса 1-ого и 8-ого порядка при изменении значений масштаба.



Рис. 3. Зависимость разрешающей способности вейвлет-функции по частоте от масштаба для вейвлета Гаусса 1-ого порядка



Рис. 4. Зависимость разрешающей способности вейвлет-функции по частоте от масштаба для вейвлета Гаусса 8-ого порядка

Вейвлет-функции при каждом значении масштаба соответствует некоторый диапазон частот, при увеличении значения масштаба этот диапазон сужается. Чем больше порядок вейвлета, тем большую разрешающую способность по частоте он обеспечивает.

Частотный анализ сигналов от дефектов и от дистанционирующих элементов показал, что спектры сигналов от дефектов и дистанционирующих элементов пересекаются, но спектр сигнала от дефекта имеет более высокочастотный характер. В результате было получено среднее значение эффективной ширины спектра сигнала от дефекта – $[0,033\div0,4]$ (нормализованная пространственная частота), при шаге сканирования равном 1 мм. Средняя эффективная ширина спектра сигнала от дистанционирующей решетки составляет $[0\div0,12]$, при шаге сканирования равном 1 мм. Спектры сигналов от решеток и дефектов пересекаются, но сигнал от дефекта имеет более высокочастотный характер. Поэтому для выделения сигналов от дефектов используется только диапазон частот $[0,12\div0,4]$.

Совместный анализ зависимости разрешающей способности по частоте вейвлет-функций от масштаба и спектров анализируемых сигналов позволяет определить необходимый для выделения дефекта частотный диапазон и соответствующий диапазон масштабов. В табл. 1 для вейвлетов различных порядков приведены значения масштабов, соответствующие тому диапазону частот, который нужно анализировать для выделения сигнала от дефекта при определенном шаге сканирования.

Вейвлет	шаг 1 мм	шаг 0,5 мм	шаг 0,2 мм
gaus 2	2	3	3
gaus 3	2	3–6	5–9
gaus 4	3–4	4–9	7–20
gaus 5	3–5	6-11	9–25
gaus 6	3–5	6–13	9–26
gaus 7	3–6	6–15	9–27
gaus 8	3-8	7–17	10–27

Табл. 1. Выбор масштаба

Из табл. 1 видно, что чем больше порядок вейвлет-функции Гаусса и больше шаг сканирования, тем больший диапазон масштабов подходит для выделения сигналов от дефектов.

В результате применения к сигналу от дефекта под решеткой непрерывного вейвлет-преобразование получен вейвлет-спектр (рис. 5), построенный с помощью вейвлет-функции Гаусса 8-ого порядка.

В связи с тем, что анализировать вейвлет-спектр в трехмерном представлении сложно, в работе для анализа использовались двумерные вейвлет-спектрограммы, представляющие собой проекцию поверхности на плоскость масштаб-координат. Пример двумерной вейвлетспектрограммы, соответствующей трехмерному вейвлет-спектру, показан на рис. 6.



Рис. 5. Вейвлет-спектр сигнала S(x) от дефекта под дистанционирующей решеткой



Для повышения качества локализации сигнала от дефекта предусматривается пороговая обработка вейвлет-спектрограммы, значение порога рассчитывается с использованием «минимаксного» критерия. Пример применения к вейвлет-спектрограмме пороговой обработки показан на рис. 7.





Рис. 7. Вейвлет-спектрограмма сигнала S(x) после пороговой обработки



В соответствие с табл. 1, для выделения дефекта нужно воспользоваться определенным диапазоном масштабов. Например, при шаге сканирования 0,2 мм был рассмотрен диапазон масштабов с 10 по 27 (рис. 8). Определение координат сигнала от дефекта базируется на процедуре обработки участка вейвлет-спектрограмм. Для каждого временного отсчета вейвлет-спектрограммы суммируются значения коэффициентов вейвлетспектра по всем масштабам.

$$Sum_{W(a,i)}(i) = \sum_{a} W(a,i) , \quad i = 1...L,$$
(4)

где L – длительность сигнала (количество отсчетов в сигнале).

По выражению (4) строится зависимость $Sum_{W(a,i)}(i) = f(W(a,i))$, которая позволяет определять координаты сигнала от дефекта. Пример обнаружения сигнала от дефекта под дистанционирующей решеткой показан на рис. 9.

Просуммировав значения коэффициентов вейвлет-спектрограммы по масштабам для каждого отсчета, получим зависимость, координаты глобальных максимумов которой по координатной оси совпадают с координатами глобальных экстремумов сигнала от дефекта, а ненулевая часть соответствует местоположению дефекта. Таким образом, в соответствии с предложенным способом можно автоматически выделять сигнал от дефекта под решеткой, т.е. ставить «рамку», координату начала и конца сигнала от дефекта.



Рис. 9. Результаты выделения координат сигнала от дефекта

В связи с тем, что дефект может располагаться произвольно относительно центра дистанционирующей решетки, была проанализирована правомерность применения предлагаемого способа для произвольного положения дефекта под решеткой. В результате анализа было установлено, что возможно выделить дефекты с произвольным расположением, если для обнаружения сигнала от дефекта применять и вещественную, и мнимую составляющие вихретоковых сигналов при частотах контроля 130 и 280 кГц дифференциального канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков, В. А. Анализ и оценка данных ВТК теплообменных труб парогенераторов Кольской АЭС / В. А. Беляков, С. В. Смирнов // 7-ой междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам : тез. докл. – Подольск, 2006. – С. 49–51.

2. Кадников, А. А. Опыт проведения вихретокового контроля теплообменных трубок ПГ. ФГУДП «Атомэнергоремонт» / А. А. Кадников, А. В. Никоноров // Докл. 7-го междунар. семинара по горизонтальным парогенераторам, 3–5 окт. 2006 г. – ФГУП ОКБ "ГИДРОПРЕСС".

3. Щукис, Е. Г. Анализ вихретоковых сигналов, полученных при контроле теплообменных труб парогенераторов / Е. Г. Щукис, В. П. Лунин // Информационные средства и технологии : тр. 15-ой междунар. науч.-техн. конф. – М., 2007. – Т. 1. – С. 122–128.

4. Shchukis, E. Wavelet transform for eddy-current signal processing / E. Shchukis, V. Lunin, M. Zelenskiy // 54rd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau. 07–10 September 2009; USB-Flash-Ausg.: Faculty of Electrical and Information Technology, Technische Universität Ilmenau. – Ilmenau : 2009. – S. 112–114.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И РЕКЛАМНЫЕ ПАРТНЕРЫ



УП «Белгазпромдиагностика» (Минск)



Редакция журнала «В мире НК» (Санкт-Петербург) Научное издание

Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов

Сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции Могилев, 19–20 сентября 2017 г.

Авторы несут персональную ответственность за содержание докладов

Технический редактор И. В. Брискина

Компьютерная верстка И. В. Брискина

Белорусско-Российский университет www.bru.by