

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Национальная академия наук Беларуси
Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Белорусская ассоциация неразрушающего
контроля и технической диагностики
Российское общество по неразрушающему
контролю и технической диагностике
УП «Белгазпромдиагностика»
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Сборник статей 7-й Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 24–25 сентября 2020 года)

Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2020

УДК 620.179.1«324»(043.2)
ББК 34.47
С56

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. *М. Е. Лустенков* (гл. редактор); д-р техн. наук, проф. *В. М. Пашкевич* (зам. гл. редактора); д-р техн. наук, проф. *А. Р. Баев* (зам. гл. редактора); канд. техн. наук, доц. *С. С. Сергеев*; д-р техн. наук, проф. *В. А. Новиков*; д-р физ.-мат. наук, доц. *А. В. Хомченко*; канд. техн. наук, доц. *С. В. Болотов*; канд. техн. наук, доц. *А. А. Афанасьев*; д-р физ.-мат. наук, проф. *В. А. Юревич*; *И. В. Брискина* (отв. секретарь)

Научное издание

С56 **Современные** методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, НАН Беларуси, Ин-т прикладной физики НАН Беларуси, Белорус. ассоц. неразрушающего контроля и техн. диагностики, Рос. общество по неразрушающему контролю и техн. диагностике, УП «Белгазпромдиагностика», Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: *М. Е. Лустенков* (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – 255 с.: ил.
ISBN 978-985-492-244-7.

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 технологий 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

ISBN 978-985-492-244-7

© Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2020

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Сборник статей 7-й Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 24–25 сентября 2020 года)

**Авторы несут персональную ответственность
за содержание публикуемых материалов**

Корректоры *Е. А. Галковская, И. В. Голубцова,*
А. А. Подошево, Т. А. Рыжикова

Компьютерный дизайн *Е. В. Ковалевская, Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 17.09.2020. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 15,93. Тираж 20 экз. Заказ № 508.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

сечения рассеяния $\bar{\sigma}_i(\lambda)$ для кривой 1 в полтора раза больше, чем максимум кривой 0, несмотря на то, что общий диаметр волокна, соответствующего кривой 1, меньше в два раза, чем представленный в [5]. Отсюда следует вывод об успешной оптимизации параметров ФКВ. Также успешность поиска оптимальных параметров синтетических волокон для получения выраженной структурной окраски можно подтвердить фактом резкого спада значения $\bar{\sigma}_i(\lambda)$ при удалении от центральной длины волны $\lambda_0 = 0,564$ мкм, на которой проводилась оптимизация.

Таким образом, в качестве критериев оптимизации параметров ФКВ с позиций получения их выраженной структурной окраски можно выбрать два условия. Первым из них является наблюдение максимумов дифференциального и интегрального сечений рассеяния в диапазоне углов наблюдения $0,5\pi \leq \alpha \leq 1,5\pi$. Вторым условием является попадание параметров ФКВ в неполную запрещенную зону фотонного кристалла при отражении падающего излучения на длине волны λ_0 , а при удалении от значения λ_0 – в разрешенные зоны. Значение λ_0 нужно выбирать исходя из необходимого преобладающего цвета ФКВ.

Работа выполнена при поддержке гранта МО ГР № 20190693 «Разработка методов расчета и оптимальное проектирование фотонно-кристаллических волокон со структурной окраской».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shao, J.** Biomimetic nanocoatings for structural coloration of textiles / J. Shao, G. Liu, L. Zhou // *Active Coatings for Smart Textiles*. – 2016. – P. 269–299.
2. **Zeng, Q.** Rapid fabrication of robust, washable, self-healing superhydrophobic fabrics with non-iridescent structural color by facile spray coating / Q. Zeng // *RSC Advances*. – 2017. – Vol. 7 (14). – P. 8443–8452.
3. Theoretical and experimental analysis of the structural pattern responsible for the iridescence of Morpho butterflies / R. H. Siddique, S. Diewald, J. Leuthold, H. Hölscher // *Optic Express*. – 2013. – Vol. 21, № 12. – P. 14351–14361.
4. **Сотский, А. Б.** Дифракция светового пучка на микроструктурном волокне / А. Б. Сотский, О. А. Бельская, Л. И. Сотская // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 11–19.
5. **Сотский, А. Б.** Моделирование структурной окраски фотонно-кристаллического волокна / А. Б. Сотский, О. А. Бельская, Л. И. Сотская // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – Т. 118, № 5. – С. 847–854.
6. **Иванов Е. А.** Дифракция электромагнитных волн на двух телах / Е. А. Иванов. – Минск: Наука и техника, 1968. – 584 с.
7. **Абрамовиц, М.** Справочник по специальным функциям / М. Абрамовиц, И. Стиган. – Москва: Наука, 1979. – 830 с.
8. Color-changing and color-tunable photonic bandgap fiber textiles / B. Gauvreau [et al.] // *OPTICS EXPRESS*. – 2008. – Vol. 16, № 20. – P. 15677–15693.

СОДЕРЖАНИЕ

АБАБУРКО В. Н., ЧЕРНАЯ Л. Г., НИКИТИН П. Ф., КАНТОР В. Ч., САЗОНКО А. Е., КАЗАК Е. М. Обобщенная методика испытаний при оценке взрывобезопасности оборудования.....	9
АББАКУМОВ К. Е., ВАГИН А. В. Особенности волновых процессов в микронеднородных средах с ориентированной трещиноватостью.....	15
БАЕВ А. Р., ЛЕВКОВИЧ Н. В., АСАДЧАЯ М. В., СЕРГЕЕВА О. С., РАЗМЫСЛОВИЧ Г. И. Моделирование рассеяния продольных волн от границы сред с дискретно изменяющейся фазой рассеянной волны.....	22
БАЕВ А. Р., МАЙОРОВ А. Л., БАБУК Е. П., КОНОВАЛОВ Г. Е. Развитие методов и средств ультразвукового контроля объектов с неоднородной структурой.....	28
БОБИНА Е. А., ДАНИЛАЕВ М. П., КЛАБУКОВ М. А., КУКЛИН В. А. Время установления пьезоэлектрического отклика монолитного прозрачного поликарбоната на изгибную деформацию.....	34
ВАСИЛЕВСКАЯ В. В., ШЕВЦОВА М. В. О необходимости совершенствования входного контроля качества задников для обуви с применением инструментальных методов.....	39
ВЕСЕЛОВА Н. М., ЗЕЛЯКОВСКИЙ Д. В. Интеллектуальные системы диагностики энергетического оборудования.....	45
ВОРОБЕЙ Р. И., ГУСЕВ О. К., ТЯВЛОВСКИЙ А. К., ТЯВЛОВСКИЙ К. Л., ШАДУРСКАЯ Л. И. Функциональные фотоэлектрические преобразователи для систем оптической диагностики.....	51
ГЕРАСИМЕНКО Н. В., БОЛОТОВ С. В. Математическое моделирование системы оперативного дистанционного контроля на основе телеграфных уравнений.....	57
ГОРКУНОВ Э. С., ПОВОЛОЦКАЯ А. М., ЗАДВОРКИН С. М., ПУТИЛОВА Е. А., МУШНИКОВ А. Н. Влияние предварительного циклического нагружения на поведение магнитных характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при упругом одноосном растяжении.....	62
ЗАВАЛЬНЮК И. П., НЕСТЕРЕНКО В. Б., ЗАВАЛЬНЮК О. П. Мониторинг местной прочности трюмов навалочных судов.....	68
ЗАЙЦЕВ Е. А., ЛЕВИЦКИЙ А. С., БЕРЕЗНИЧЕНКО В. А., СУХОРУКОВА А. Е. Адаптивная информационно-измерительная система контроля механического состояния мощных гидрогенераторов.....	75

КОВАРСКАЯ Е. З., МОСКОВЕНКО И. Б., ПАВЛОВ И. В. Контроль качества и физико-механических свойств твердых и сверхтвердых материалов по звуковому индексу.....	82
КОСТИН В. Н., ВАСИЛЕНКО О. Н. О возможности и необходимости локального измерения магнитных свойств «тела» и «вещества» при структуроскопии материалов и изделий.....	93
ЛЕВИЦКИЙ А. С., ЗАЙЦЕВ Е. А., ПАНЧИК М. В. Контроль сердечника статора турбогенератора при сборке.....	99
ЛУНИН В. П., ЖДАНОВ А. Г. Перспективы использования цифровых моделей для решения актуальных задач в атомной энергетике.....	106
МУРАШКО Н. И., ГОЛУБЦОВ Д. В., РОМАНОВИЧ К. А. Дистанционное обнаружение аварийных ситуаций на подземных трубопроводах.....	114
ОСАДЧИЙ И. А., ЛИПНИЦКИЙ В. А. Формирование диагностических параметров на основе анализа инерциальной оси вращения вала.....	119
ПАВЛЮЧЕНКО В. В., ДОРОШЕВИЧ Е. С. Компьютерные расчеты магнитных полей с использованием гистерезисных свойств магнитного носителя.....	125
ПАВЛЮЧЕНКО В. В., ДОРОШЕВИЧ Е. С. Численные расчеты распределений электрического сигнала преобразователя магнитного поля при гистерезисной интерференции.....	132
ПАНКЕВИЧ Д. К., БУРКИН А. Н., ИВАШКО Е. И. Методика исследования водопроницаемости мембранных материалов при моделировании условий эксплуатации.....	139
ПАНТЕЛЕЕВ К. В., СВИСТУН А. И., МИКИТЕВИЧ В. А., ЖАРИН А. Л. Контроль напряженно-деформированного состояния полимерных материалов методом контактной разности потенциалов.....	146
ПОЗДНЯКОВ В. Ф., ПРУДНИКОВ А. Н. Лабораторный стенд по акустико-эмиссионному методу контроля.....	153
РАДЮК А. Н., КОЗЛОВА М. А., БУРКИН А. Н. Прогнозирование эксплуатационных свойств подошв обуви.....	157
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Методические особенности и приборная реализация магнитного контроля физико-механических свойств ответственных крепежных компонентов.....	163
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Условия повышения достоверности двухпараметрового косвенного измерения свойств сталей по сравнению с однопараметровым.....	170
СЕРГЕЕВ С. С., НИКЕЕВ А. М., СЕРГЕЕВА О. С. Оценка метрологических возможностей комплексного ультразвукового контроля сварных соединений.....	177

центральной длине волны $\lambda_0 = 0,564$ мкм между всеми кластерами, составляющими волокно. Данный эффект может быть объяснен зонной теорией двумерных фотонных кристаллов, в соответствии с которой найденные оптимальные значения периода решетки и радиуса отверстий воздушных каналов обеспечивают при отражении падающего светового поля работу ФКВ в неполной запрещенной зоне.

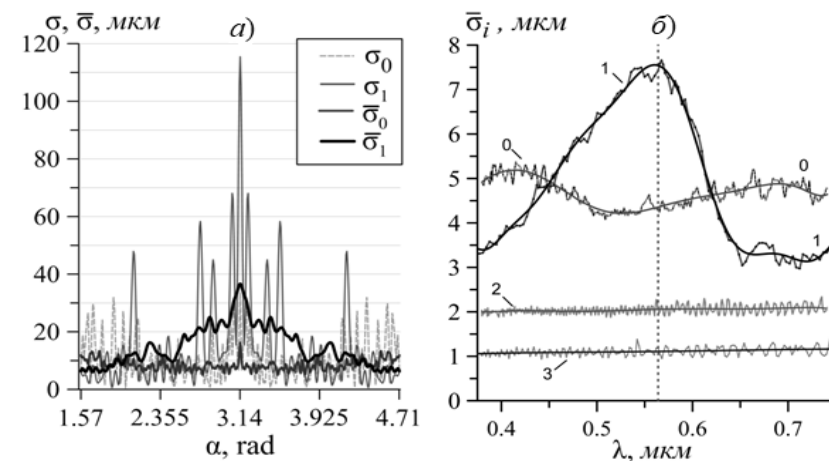


Рис. 2. Угловые зависимости дифференциальных (а) сечений рассеяния $\bar{\sigma}(\alpha)$ на длине волны $\lambda_0 = 0.564$ мкм и спектральные зависимости интегральных (б) сечений рассеяния $\bar{\sigma}_i$ для ФКВ. Номера кривых соответствуют: 0 – ФКВ, исследованному в [5]; 1 – оптимизированному кластерному ФКВ; 2, 3 – однородному волокну с диаметрами 20 мкм, и 10 мкм соответственно

Также из рис. 2, а можно сделать вывод, что в диапазоне углов наблюдения $0,75\pi \leq \alpha \leq 1,20\pi$ (или $135^\circ \leq \alpha \leq 216^\circ$) значения $\bar{\sigma}_1(\alpha)$ больше в 2–3 раза значений $\bar{\sigma}_0(\alpha)$. Данное обстоятельство представляет практический интерес, т. к. в реальных условиях наблюдать окрашивание в направлении, обратном к направлению падающего излучения, чрезвычайно сложно.

Как следует из рис. 2, б зависимости интегральных сечений рассеяния $\bar{\sigma}_i(\lambda)$ для волокон без воздушных каналов (номера кривых 2 и 3) не имеют экстремумов и отличаются усредненными значениями, соотношение которых пропорционально отношению диаметров волокон. По сравнению с ними остальные кривые имеют выраженные экстремумы. Для оптимизированной конфигурации $K_{\sigma,1} = 60\%$, что в 3 раза больше, чем для случая ФКВ, рассмотренного в [5] ($K_{\sigma,0} = 19\%$). Кроме того, значение максимума

Если ориентация ФКВ в ткани является случайной, окраску ткани можно охарактеризовать дифференциальным сечением рассеяния $\bar{\sigma}(\alpha)$ и интегральным сечением $\bar{\sigma}_i$, усредненным по ψ :

$$\bar{\sigma}(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma(\alpha) d\psi, \quad \bar{\sigma}_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_i d\psi = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} d\psi \int_{0.5\pi}^{1.5\pi} \sigma(\alpha) d\alpha. \quad (6)$$

Введем в рассмотрение величину

$$K_\sigma = \left[(\bar{\sigma}_i)_{\max} - (\bar{\sigma}_i)_{\min} \right] / (\bar{\sigma}_i)_{\max}, \quad (7)$$

характеризующую контраст наблюдаемой структурной окраски ФКВ. Здесь $(\bar{\sigma}_i)_{\max}$ и $(\bar{\sigma}_i)_{\min}$ – максимальное и минимальное значения интегрального сечения рассеяния, усредненного по углам α и ψ по формуле (6).

По описанному алгоритму расчёта дифракционных полей на границе волокна с кластерным сечением создано приложение на языке Fortran 90. С целью усиления структурной окраски ФКВ производился поиск по нормированным на длину волны периоду гексагональной симметрии Λ/λ и диаметру каждого воздушного канала d/λ . В качестве материала оболочки выбран полиэтилентерефталат (PETF) с диэлектрической проницаемостью оболочки $\varepsilon_s = (1,576)^2$ [4,5], окружающая среда – воздух. Для упрощения и ускорения расчётов рассматривался один кластер, состоящий из 19 воздушных каналов с гексагональным расположением, находящийся в среде с диэлектрической проницаемостью ε_s . Данное условие аналогично рассмотрению сечений рассеяния отдельного кластера в системе волокна, состоящего из нескольких кластеров. В ходе данного поиска максимальные значения $\sigma(\alpha)$ и σ_i были обнаружены при значениях $\Lambda/\lambda = 0,45$, $d/\lambda = 0,3666$. Если выбрать в качестве рабочего цвета окраски ФКВ зеленый с длиной волны $\lambda = 0,564$ мкм (данное значение соответствует максимуму чувствительности человеческого глаза [5]), то оптимальные период и диаметр воздушных каналов равны $\Lambda = 0,254$ мкм, $d = 0,207$ мкм. Поперечное сечение ФКВ, состоящего из 30 кластеров, центры которых подчиняются гексагональной симметрии с указанными оптимальными размерами воздушных каналов, приведено на рис. 1, б.

Расчетные угловые и спектральные распределения дифференциальных и интегральных сечений рассеяния, а также интерполированные полиномом кривые для данного волокна и для конфигурации ФКВ из [5] представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, а, $\bar{\sigma}(\alpha)$ вида (6) достигает своего максимума при угле наблюдения $\alpha = \pi$, что объясняется мощной резонансной связью на

СКУРТУ И. Т., БРАНОВИЦКИЙ И. И. Управление сложностью анализа магнитных цепей с помощью геометрической инвариации.....	185
СОТСКАЯ Л. И., СТАСЬКОВ Н. И., СОТСКИЙ А. Б., ГАПОНЕНКО Н. В., ЛАШКОВСКАЯ Е. И., ЕЩИК Т. Н. Спектрофотометрия неоднородного слоя титаната бария, допированного европием.....	190
СТАРОВОЙТОВ А. Г., ХОМЧЕНКО А. В. Особенности применения поляризационной модуляции при контроле оптической активности материалов.....	197
СЧАСТНЫЙ А. С., БУРАК В. А. Механическая и магнитная анизотропия листового проката сталей.....	204
ТРЕТЬЯКОВ А. С., НЕКИПЕЛОВ А. О. Разработка программного обеспечения для контроля теплового состояния асинхронного электропривода в рамках системы «ПЧ-АД».....	208
ТЯВЛОВСКИЙ А. К., ГУСЕВ О. К., ПАНТЕЛЕЕВ К. В., ТЯВЛОВСКИЙ К. Л., СВИСТУН А. И., ЖАРИН А. Л. Картирование дефектов прецизионных поверхностей с использованием методов зондовой электрометрии.....	213
ТЯВЛОВСКИЙ А. К., ВОРОБЕЙ Р. И., ГУСЕВ О. К., ЖАРИН А. Л., ПОВЕДАЙКО А. Д., ТЯВЛОВСКИЙ К. Л. Цифровая обработка сигнала сканирующего зонда Кельвина на основе быстрого преобразования Хартли.....	219
ХОМЧЕНКО А. В., ПРИМАК И. У., ВОЙТЕНКОВ А. И., КУЛЬБЕНКОВ В. М. Анализ остаточных напряжений в приповерхностном слое закаленного стекла.....	224
ЧЕРНЫШЕВ А. В., ЗАГОРСКИЙ И. Е., ШАРАНДО В. И. Контроль толщины хромового покрытия на никелевом основании вихретоковым методом.....	232
ШАРАНДО В. И., ЧЕРНЫШЁВ А. В., КРЕМЕНЬКОВА Н. В. Отстройка от влияния структуры при контроле никелевых покрытий толщиномерами типа МТЦ.....	236
ШИЛОВ А. В., БОРОВИКОВА С. А., КУШНЕР А. В., НОВИКОВ В. А. Контрольный образец для дефектоскопии ферромагнитных объектов методом визуализирующей пленки.....	242
ШИЛОВ А. В., СОТСКИЙ А. Б. Структурная окраска синтетических фотонно-кристаллических волокон с кластерной компоновкой воздушных каналов.....	249

CONTENTS

ABABURKO V. N., CHORNAYA L. G., NIKITIN P. F., KANTOR V. CH., SAZONKA A. Y., KAZAK Y. M. Generalized test procedure for assessing explosion safety of equipment.....	9
ABBAKUMOV K. E., VAGIN A. V. Wave processes features in micro-inhomogeneous mediums with oriented fracturing	15
BAEV A. R., LEVKOVICH N. V., ASADCHAYA M. V., SERGEEVA O. S., RAZMYSLOVICH G. I. Simulation of longitudinal wave scattering from the boundary of a medium with a changing phase of reflected waves	22
BAEV A. R., MAYOROV A. L., BABUK E. P., KONOVALOV G. E. Development of methods and means of ultrasonic control of objects with inhomogeneous structure.....	28
BOBINA E. A., DANILAEV M. P., KLABUKOV M. A., KUKLIN V. A. Piezoelectric response time setting of monolithic transparent polycarbonate to bending deformation.....	34
VASILEVSKAYA V. V., SHEVTSOVA M. V. On the necessity of input control quality improvement of shoe contours with the instrumental methods' application.....	39
VESELOVA N. M., ZELYAKOVSKY D. V. Intelligent methods of diagnostics of power equipment.....	45
VOROBAY R. I., GUSEV O. K., TYAVLOVSKY A. K., TYAVLOVSKY K. L., SHADURSKAYA L. I. Functional photoelectric converters for optical diagnostics systems.....	51
HERASIMENKO N. V., BOLOTOV S. V. Mathematical modeling of operational remote control system based on telegraph equations	57
GORKUNOV E. S., POVOLOTSKAYA A. M., ZADVORKIN S. M., PUTILOVA E. A., MUSHNIKOV A. N. Effect of preliminary cyclic loading on magnetic behaviour of 08G2B hot-rolled steel under elastic uniaxial tension	62
ZAVALNIUK I. P., NESTERENKO V. B., ZAVALNIUK O. P. The local strength of bulk carriers' holds monitoring	68
ZAITSOV I. O., LEVITSKYI A. S., BEREZNYCHENKO V. O., SUKHORUKOVA O. E. Adaptive information-measuring control system powerful hydrogenerators mechanical condition	75
KOVARSKAYA E. Z., MOSKOVENKO I. B., PAVLOV I. V. Quality control and control of physical and mechanical properties of solid and supersolid materials by sound index.....	82
KOSTIN V. N., VASILENKO O. N. On the possibility and necessity of local measurement of the magnetic properties of the «object» and «materials» in the structurescopy of materials and products	93

Конечной целью является получение алгебраической системы уравнений для всего волокна в виде:

$$B_v = S_{v\mu} A_\mu, \quad (1)$$

где $S_{v\mu}$ – глобальная матрица рассеяния всего волокна, B_v – амплитуды функций Ханкеля рассеянного поля на внешней границе волокна; A_μ – амплитуды функций Бесселя для падающего поля плоской волны, которые считаются известными.

Как известно [5, 6], степень структурной окраски ФКВ определяется интенсивностью и монохроматичностью рассеянного света в дальней зоне при условии освещения ФКВ неполяризованным светом от удаленного точечного источника. Поэтому имеет смысл исследовать погонное дифференциальное поперечное сечение рассеяния вида

$$\sigma(\alpha) = 0.5 [\sigma_p(\alpha) + \sigma_s(\alpha)], \quad (2)$$

где α – угол наблюдения, отсчитанный от нормали к волновому фронту падающего пучка, а $\sigma_p(\alpha)$ и $\sigma_s(\alpha)$ – погонные дифференциальные поперечные сечения рассеяния плоских волн ТМ- и ТЕ-поляризации вида

$$\sigma_{p,s}(\alpha) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho |H_z, E_z|^2. \quad (3)$$

Если падающее поле на внешней границе волокна представить рядами по функциям Бесселя с амплитудами $A_\mu = \exp[i\mu(\psi - \pi)]$ (ψ – угол ориентации волокна по отношению к волновому фронту падающей плоской волны (см. рис. 1, а)) и воспользоваться известными асимптотиками для функций Ханкеля [7], представляющих рассеянное поле, то (3) приводится к виду:

$$\sigma_{p,s}(\alpha) = \frac{4}{k_0 \sqrt{\varepsilon_a}} \left| \sum_{\nu=-n}^n \exp(i\nu\alpha) \sum_{\mu=-n}^n S_{v\mu}^{(p),(s)} \exp[i(\mu - \nu)(\psi - \pi)] \right|^2, \quad (4)$$

где под $S_{v\mu}^{(p)}$ и $S_{v\mu}^{(s)}$ понимаются глобальные матрицы рассеяния всего волокна, относящиеся к волнам ТМ- и ТЕ-поляризации, фигурирующие в (1) соответственно.

В текстильной промышленности представляет интерес оценка окраски ФКВ, находящегося на черном фоне [8]. Ее можно охарактеризовать интегральным погонным поперечным сечением рассеяния ФКВ вида

$$\sigma_i = \frac{1}{2\pi} \int_{0.5\pi}^{1.5\pi} \sigma(\alpha) d\alpha. \quad (5)$$

способом такого уменьшения с сохранением общего диаметра волокна не менее 20 мкм (последнее условие важно с позиций потребительских свойств волокна) является переход к кластерной внутренней структуре ФКВ (рис. 1, б). Соответствующие оценки представлены в настоящей работе. Для их получения мы развили известный метод функций Грина [4, 5], который в своей исходной форме к расчету ФКВ с кластерной структурой не применим в виду аппаратного ограничения на выделение оперативной памяти для хранения элементов трехмерных массивов матриц рассеяния, размер которых неуклонно возрастает с увеличением числа воздушных каналов в оболочке.

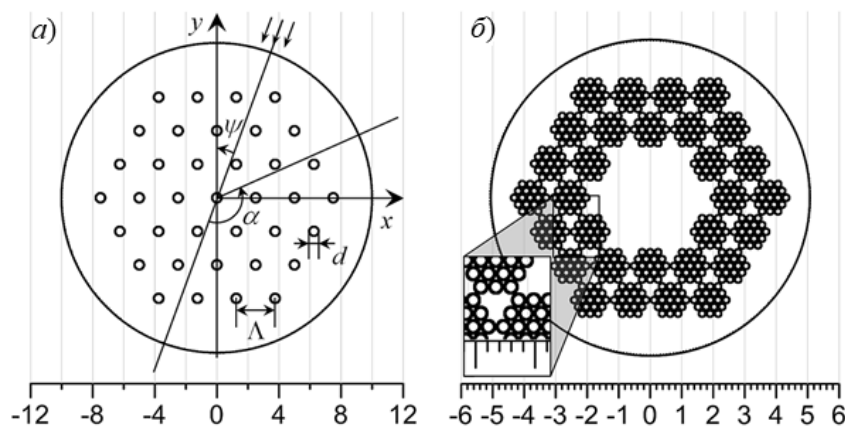


Рис. 1. Сечение ФКВ с одиночными круглыми воздушными каналами (а) и кластерной структурой воздушных каналов (б) в диэлектрической матрице. Оцифровка шкал дана в микронах

Ограничение на выделение оперативной памяти можно преодолеть, если в сечении волокна выделить одинаковые области или кластеры, которые могут содержать один или несколько, вплоть до нескольких десятков, воздушных каналов с различной формой и ориентацией поперечного сечения (см. рис. 1, б). В таком случае продольные компоненты поля H_z и E_z волн ТМ и ТЕ поляризации, рассеянные кластером, вычисляются однократно, а ориентация различных кластеров учитывается при алгебраизации дифракционной задачи методом функций Грина. Алгоритм расчёта рассеянных полей сводится к раздельному расчёту матриц рассеяния падающих волн ТЕ- и ТМ-поляризаций сначала для одного кластера, а затем и для всего ФКВ. При этом осуществляется учёт взаимодействия полей между всеми кластерами и внешней границей ФКВ.

LEVYTSKYI A. S., ZAITSEV I. O., PANCHYK M. V. Turbogenerator stator core assembly control	99
LUNIN V. P., ZHDANOV A. G. Prospects for using digital models for solving current problems in atomic energy.....	106
MURASHKO N. I., GOLUBTSOV D. V., ROMANOVICH K. A. Remote detection of emergencies on underground pipelines.....	114
OSADCHIY I. A., LIPNITSKY V. A. Formation of diagnostic parameters on basis of analysis of inertial axis of shaft's rotation.....	119
PAVLYUCHENKO V. V., DOROSHEVICH E. S. Computer calculations of magnetic fields using hysteresis properties of a magnetic carrier.....	125
PAVLYUCHENKO V. V., DOROSHEVICH E. S. Numerical calculations of the electric signal distributions of the magnetic field converter in hysteresis interference.....	132
PANKEVICH D. K., BURKIN A. N., IVASHKO E. I. Methods for studying water permeability of membrane materials when simulating operating conditions.....	139
PANTSIALEYEU K. U., SVISTUN A. I., MIKITSEVICH U. A., ZHARIN A. L. Control of the stress-deformed state of polymers by the contact potential difference technique.....	146
POZDNIYAKOV V. F., PRUDNIKOV A. N. Research test bench for acoustic emission testing.....	153
RADYUK A. N., KOZLOVA M. A., BURKIN A. N. Predicting the performance properties of shoe soles.....	157
SANDOMIRSKI S. G. Methodological features and a device for magnetic control of the mechanical properties of critical fastening components.....	163
SANDOMIRSKI S. G. Conditions of increasing dependence of two-parameter indirect measurement of properties of steels compared to one-parameter.....	170
SERGEEV S. S., NIKEEV A. M., SERGEEVA O. S. Assessment of metrological possibilities of integrated ultrasonic testing of welded joints.....	177
SKURTU I. T., BRANOVITSKY I. I. Magnetic circuits analysis complexity control by means of geometric invariance	185
SOTSKAYA L. I., STASKOV N. I., SOTSKY A. B., GAPONENKO N. V., LASHKOVSKAYA E. I., ESCHIK T. M. Spectrophotometry of an inhomogeneous layer of barium titanate doped with europium.....	190
STAROVOYTOV A. G., KHOMCHENKO A. V. Features of application of polarization modulation in control of the optical activity of materials.....	197

SCHASTNY A. S., BURAK V. A. Mechanical and magnetic anisotropy of rolled steels.....	204
TRETSIAKOU A. S., NEKIPELAU A. O. Development of software for control of thermal state of induction motor within «FT-IM» system.....	208
TYAVLOVSKY A. K., GUSEV O. K., PANTSIALEYEU K. U., TYAVLOVSKY K. L., SVISTUN A. I., ZHARIN A. L. Mapping defects of precision surfaces using probe electrometry methods.....	213
TYAVLOVSKY A. K., VOROBAY R. I., GUSEV O. K., ZHARIN A. L., POVEDAYKO A. D., TYAVLOVSKY K. L. Digital signal processing for scanning Kelvin probe using fast Hartley transform.....	219
KHOMCHENKO A. V., PRIMAK I. U., VOYTENKOV A. I., KUL' BENKOV V. M. Analysis of residual mechanical stresses in the surface layer of tempered glass.....	224
CHERNYSHEV A. V., ZAGORSKIY I. E., SHARANDO V. I. Control of thickness of the chrome coating on the nickel base using eddy currents method.....	232
SHARANDO V. I., CHERNYSHEV A. V., KREMENKOVA N. V. Elimination the influence of the structure during control of the nickel coatings with help thickness meter mtc type.....	236
SHILOV A. V., BOROVIKOVA S. A., KUSHNER A. V., NOVIKOV V. A. Control sample for flaw detection of ferromagnetic by objects the vizualizing film method.....	242
SHILOV A. V., SOTSKY A. B. Structural coloring of synthetic photonic-crystalline fibers with a clustered composition air channels.....	249

УДК 535.2:621.372.8

СТРУКТУРНАЯ ОКРАСКА СИНТЕТИЧЕСКИХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С КЛАСТЕРНОЙ КОМПОНОВКОЙ ВОЗДУШНЫХ КАНАЛОВ

А. В. ШИЛОВ, А. Б. СОТСКИЙ

Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова
Могилёв, Беларусь

UDC 535.2:621.372.8

STRUCTURAL COLORING OF SYNTHETIC PHOTONIC-CRYSTALLINE FIBERS WITH A CLUSTERED COMPOSITION AIR CHANNELS

A. V. SHILOV, A. B. SOTSKY

Аннотация. Рассмотрена проблема достижения выраженной структурной окраски синтетических фотонно-кристаллических волокон. Показано, что возможный путь ее решения – использование кластерной компоновки внутренних воздушных каналов волокна.

Ключевые слова: структурная окраска, фотонно-кристаллическое волокно, сечение рассеяния, зонная теория.

Abstract. The problem of achieving a pronounced structural color of synthetic photonic-crystal fibers is considered. It is shown that a possible way of its solution is the use of a cluster arrangement of the internal air channels of the fiber.

Key words: structural coloration, photonic crystal fiber, scattering cross section, band gap.

Анализ природных объектов, имеющих выраженную структурную или дифракционную окраску [1–3], показывает, что для интенсивного рассеивания некоторого достаточно узкого участка видимого спектра (порядка 100...200 нм); характерный размер рассеивающих частиц или неоднородностей поверхности должен быть сравнимым или даже в несколько раз меньше длины волны света, испытывающего рассеяние [1–3]. Например, в работе [3], исследовав микроскопическую структуру чешуек крыльев ярко окрашенной бабочки вида *Morpho sulowskyi*, авторы определили, что толщины чередующихся пластинок с воздушными прослойками, равны 65 и 150 нм соответственно. Эти элементы эффективно рассеивают световые волны синего участка спектра с центральной длиной волны 0,495 мкм. С другой стороны, в [4, 5] было показано, что дифракционное рассеяние света синтетическим фотонно-кристаллическим волокном (ФКВ) с гексагональной внутренней структурой периода $\Lambda = 2,5$ мкм и с диаметром воздушных каналов $d = 0,6$ мкм (рис. 1, а) низко контрастно, поскольку наблюдается в достаточно широкой области спектра. Из сказанного ясно, что улучшения качества структурной окраски ФКВ можно ожидать на пути уменьшения размеров Λ и d . Возможным

– графики зависимостей расстояния между минимумами коэффициента диффузного отражения света от пленки $r(x)$ в зоне индикаторного рисунка дефекта от глубины его залегания, позволяющие определить глубину залегания несплошности [7];

– семейство графиков зависимостей приращения Δr_m коэффициента диффузного отражения света от пленки от глубины залегания дефекта разной величины, позволяющие определить величину дефекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шилов А. В.** Дефектоскопия ферромагнитных объектов с визуализацией магнитных полей на пленке: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Шилов – Могилев, 2015. – 24 с.
2. **Боровикова С. А.** О необходимости разработки контрольных образцов для дефектоскопии ферромагнитных объектов методом визуализирующей пленки / С. А. Боровикова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: сб. тр. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – 266 с.
3. Каталог ярмарки инновационных разработок «Приборостроение» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://belisa.org.by/pdf/2018/katalog_19.pdf. – Дата доступа: 23.07.2020.
4. **Новиков, В. А.** Исследование коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля в области дефекта / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 88–98.
5. **Шилов, А. В.** Обнаружение реальных дефектов в ферромагнитных объектах с помощью визуализирующей магнитные поля пленки / А. В. Шилов, А. В. Кушнер, В. А. Новиков // Дефектоскопия. – 2016. – № 4. – С. 41–47.
6. **Новиков, В. А.** Экспериментальные исследования коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта при контроле ферромагнитных объектов / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2014. – № 3. – С. 40–49.
7. **Новиков, В. А.** Определение глубины залегания и диаметра несплошности при контроле ферромагнитных объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 106–116.

УДК 621.3:658.34

ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

**В. Н. АБАБУРКО¹, Л. Г. ЧЕРНАЯ¹, П. Ф. НИКИТИН¹, В. Ч. КАНТОР²,
А. Е. САЗОНКО², Е. М. КАЗАК²**

¹Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

²Департамент по надзору за безопасным ведением работ в промышленности
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
(Госпромнадзор)

Минск, Беларусь

UDC 621.3:658.34

GENERALIZED TEST PROCEDURE FOR ASSESSING EXPLOSION SAFETY OF EQUIPMENT

**V. N. ABABURKO, L. G. CHORNAYA, P. F. NIKITIN, V. CH. KANTOR,
A. Y. SAZONKA, Y. M. KAZAK**

Аннотация. В статье рассматривается обобщенная методика проведения оценки взрывобезопасности оборудования для применения во взрывоопасных средах при его сертификации.

Ключевые слова: взрывобезопасность, испытания, методика, сертификация.

Abstract. The article discusses a generalized technique for assessing the explosion safety of equipment for use in explosive environments during its certification.

Key words: explosion safety, testing, methodology, certification.

Обеспечение безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах связано с обязательной сертификацией на основании проведенных испытаний. Процедура испытаний по оценке взрывобезопасности описана в ряде различных нормативных документов и правил, что вызывает затруднения как у заявителя, так и у представителей испытательных центров при планировании временных и материальных затрат. С этой целью разработана обобщенная методика испытаний при оценке взрывоопасности оборудования. Образец (или прототип) подвергают испытаниям в соответствии с требованиями к типовым испытаниям и испытаниям, связанными с конкретными видами взрывозащиты.

Исходными данными для оценки взрывобезопасности отобранных образцов оборудования являются:

- вид оборудования: электрическое или неэлектрическое;
- вариант исполнения: взрывозащищенное оборудование, кабельный ввод или Ex-компонент;

– группа оборудования, регламентирующая область применения:
 I – рудничное, II – для применения в газовоздушных взрывоопасных смесях,
 III – для применения в пылевоздушных зонах;

– используемые виды взрывозащит;

– вид электрооборудования: источник электрической энергии, вращающаяся электрическая машина, коммутационный аппарат, прибор, светильник или система электрического обогрева;

– конструктивное исполнение оболочки: металлическая конструкция со стеклянными элементами или без них, неметаллические оболочки или металлические оболочки с учитываемыми металлическими частями;

– наличие в оборудовании источников электромагнитного, ультразвукового или оптического излучения;

– требуемый уровень защиты от проникновения твердых тел и воды (код IP);

– возможный диапазон температур окружающей среды при эксплуатации оборудования;

– возможность воздействия химически агрессивных жидкостей;

– климатическое исполнение и категория размещения оборудования.

Типовая схема испытаний оценки взрывобезопасности оборудования всех устройств, устанавливаемых во взрывоопасных средах, включает:

1) испытание оболочки, при котором учитывается ее конструкция и использованные для ее материалы, а также группа оборудования;

2) тепловые испытания;

3) проверка целостности заземления;

4) испытания переносимости заряда (для оболочек и элементов, способных накапливать электричество);

5) испытания используемых специализированных несертифицированных элементов оборудования: вентиляторов, эластомерных уплотнительных колец;

6) специализированные испытания в зависимости от вида взрывозащиты оборудования.

Оболочки оборудования (металлические, содержащие части из стекла и керамики) должны быть подвергнуты типовым испытаниям на:

– ударостойкость;

– сбрасывание;

– соответствие степени защиты (IP), обеспечиваемой оболочкой.

Тепловые испытания включают следующие этапы:

1) измерение эксплуатационной температуры;

2) определение максимальной температуры поверхности оборудования с учетом максимально допустимой температуры окружающей среды, при этом для оборудования группы III учитывается глубина слоя пыли, накапливаемой на оборудовании.

поля, а при приближении к внутренней поверхности – замедляется убывание его поля и даже происходит некоторый его рост. Аналогично ведет себя и коэффициент диффузного отражения света от пленки в месте индикаторного рисунка дефекта.

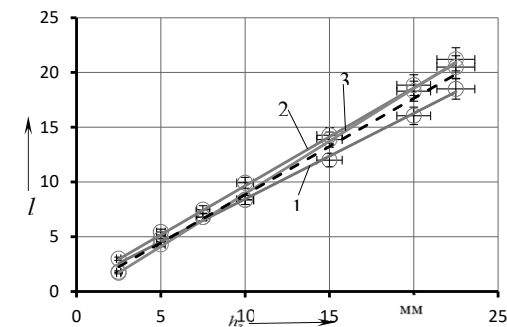


Рис. 4. Графики зависимостей расстояния l между минимумами коэффициента диффузного отражения света от пленки, обусловленного отверстиями диаметром 3, 5, 6 мм, от глубины их залегания h_z в образце: 1 – $d = 3$ мм; 2 – $d = 4$ мм; 3 – $d = 5$ мм; - - - средняя линия

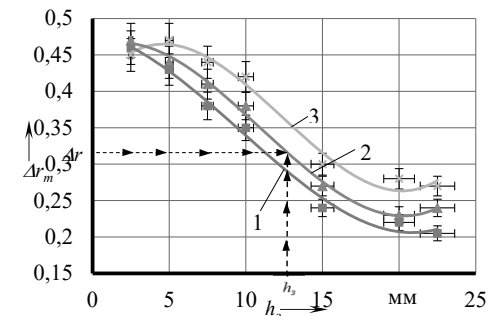


Рис. 5. График зависимости максимального приращения коэффициента диффузного отражения света от пленки Δr_m от глубины залегания h_z отверстий разного диаметра: 1 – $d = 3$ мм; 2 – $d = 4$ мм; 3 – $d = 5$ мм.

Таким образом, разработан контрольный (испытательный) образец, включающий полученные при установленных условиях контроля:

– таблица (или линейка) изображений индикаторных рисунков отверстий, находящихся на различной глубине в образце, позволяющая установить наличие *протяженного* дефекта в объекте и приблизительно оценить глубину его залегания;

излучению. Затем определяли значения интенсивности падающего на магнитоноситель светового излучения, вычисляли соответствующий каждому указанному пикселю коэффициент отражения магнитоносителя $r = \Phi_r / \Phi_0$, где Φ_r – отраженный от пленки, а Φ_0 – падающий на пленку световой поток. Для каждого изображения строили график зависимости коэффициента диффузного отражения света r от расстояния x , отсчитываемого от плоскости симметрии индикаторного рисунка отверстия на пленке в поперечном направлении, выводили его на монитор (рис. 3) [7].

На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента диффузного отражения света r от пленки в зоне индикаторного рисунка отверстия диаметром 3 мм, расположенного на глубине 2,5 мм, от расстояния x поперек несплошности. Как видно, $r(x)$ имеет вид остроконечного импульса с ярко выраженным максимумом и двумя минимумами по обе его стороны [4, 5].

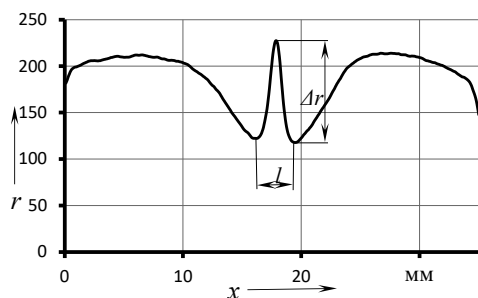


Рис. 3. График зависимости коэффициента диффузного отражения света r от пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от расстояния x

Затем строили графики зависимостей расстояния l между минимумами коэффициента диффузного отражения света $r(x)$ от пленки, обусловленного отверстиями диаметром 3, 4, 5 мм, от глубины их залегания h , в образце (рис. 4). Из рисунка видно, что это расстояние l возрастает при увеличении глубины залегания отверстия и не зависит от диаметра отверстия.

Потом строили семейство графиков зависимостей приращения коэффициента диффузного отражения света Δr_m от глубины залегания h отверстий различного диаметра (рис. 5). Чтобы определить диаметр несплошности, восстанавливают перпендикуляры из точек осей, соответствующих значениям Δr_m и h до их пересечения. Точка пересечения укажет значение d [7].

Как видно из рис. 5, с ростом глубины залегания отверстия наблюдается уменьшение значения приращения коэффициента диффузного отражения света на поверхности пленки в зоне индикаторного рисунка отверстия. Известно, что при приближении дефекта сплошности к наружной поверхности пластины замедляется рост тангенциальной составляющей его

Особое внимание необходимо уделять испытаниям, связанным с определением максимальной температуры поверхности оборудования, так как нагретые части оборудования свыше температуры самовоспламенения окружающей взрывоопасной среды могут стать источником воспламенения. Максимальная температура поверхности указывается в маркировке взрывозащиты оборудования и учитывается при его выборе при проектировании установок для работы во взрывоопасных зонах.

При определении максимальной температуры поверхностей необходимо обращать внимание на электродвигатели, получающие питание от преобразователей. Если электродвигатель подключен к преобразователю для обеспечения возможности работать с разными скоростями и нагрузками, необходимо выполнить ряд типовых испытаний и расчетов для определения тепловых характеристик двигателя при работе от преобразователя для всего диапазона указанных скоростей и крутящих моментов.

Целью испытаний является определение возможности взрывобезопасной эксплуатации стандартного самовентилируемого взрывозащищенного электродвигателя, питаемого от преобразователя частоты с помощью длинного кабеля в регулируемом электроприводе.

Специалисты НИЛ «Взрывозащищенное электрооборудование» Белорусско-Российского университета совместно со специалистами Госпромнадзора разработали программы и методики проведения совместных испытаний частотно-регулируемых электроприводов и приводных механизмов, установленных во взрывоопасных зонах с учетом вида взрывозащиты электродвигателя, типа преобразователя, конструкции приводного механизма для определения безопасных условий эксплуатации.

Программа испытаний состоит из следующих этапов:

- 1) измерение сопротивления изоляции обмоток статора относительно корпуса электродвигателя;
- 2) измерение сопротивления обмотки статора при постоянном токе в практически холодном состоянии;
- 3) испытание повышенным напряжением промышленной частоты обмоток статора электродвигателя;
- 4) измерение пиков линейного напряжения на зажимах электродвигателя и среднеквадратичного значения линейного напряжения;
- 5) измерение действующего значения тока электродвигателя;
- 6) измерение вибрации подшипников (вала) электродвигателя;
- 7) измерение сопротивления изоляции силового кабеля электродвигателя;
- 8) испытание изоляции силового кабеля электродвигателя повышенным выпрямленным напряжением;
- 9) измерение (контроль) теплового состояния электродвигателя;
- 10) определение дополнительных потерь и полезной мощности на валу электродвигателя;

11) проверка выполнения заземления всех элементов привода и уравнивания потенциалов.

Так как возникают трудности при проведении испытаний для определения дополнительных потерь (этап 10), обусловленных питанием двигателя от преобразователя частоты как полигармонического источника напряжения, предлагается метод имитационного исследования (моделирования) тепловых процессов в электродвигателе при питании от АИН-ШИМ с различными законами частотного управления. Программное обеспечение TermoDrive v. 1.6.1, разработанное НИЛ «Взрывозащищенное электрооборудование» Белорусско-Российского университета, позволяет определить допустимую полезную мощность на валу электродвигателя.

На рис. 1 представлено окно разработанного программного обеспечения TermoDrive v. 1.6.1 по тепловому расчету частотно-регулируемого взрывозащищенного электропривода бустерного компрессора, установленного на ОАО «Нафтан» завода «Полимир».

Ввод данных - TermoDrive 1.6.1 Тепловой расчет частотно-регулируемого взрывозащищенного ЭП

Интегрированные исходные данные теплового расчета

Предприятие: Завод "Полимир" ОАО "Нафтан"

Установка(цех): поз. 43С1, цех №102

Класс зоны: В-Ia

Требуемая мощность приводной установки, кВт: 202

Технические характеристики двигателя

Тип электродвигателя: BS18720TEFCWp

Маркировка взрывозащиты АД: FLP-GIII (1ExdII BT3Gb)

Номинальная мощность P_{2n} , кВт: 202,0

Номинальное напряжение статора U_n , В: 6000

cos φ , н: 0,66

Номинальный ток статора I_n , А: 31,6

Класс изоляции: В

Доп. перегрев обм. статора $T_{доп}$, град: 50

Номинальная частота f_n , Гц: 50

Число пар полюсов p : 6

Номинальная частота вращения $n_{об/мин}$: 595

Коэфф. укрущ. теплоотд. β_o (0,25...0,35...0,6) (0,35...0,55...0,6): 0,35

Актив. сопрот. статора R_1 , Ом: 1,4160

Приведенное сопр. ротора R'_2 : 2,9512

Приведенный ток ротора I'_2 : 10,1

Диаметр статора D , м: 0,6600

Масса магнитопровода m , кг: 444,57

Уд. магнитные потери P_{1050} (1...2,5): 1,20

Магнитная индукция $B_{Тл}$ (1...1,7): 1,200

Коэфф. завис. от марки стали $\beta_{1.5}$ (1...1,16): 1,20

Коэфф. греющих потерь p (0,425...0,6): 0,425

Мак темп. пов-ти в соответствии с маркировкой взрывозащиты, град: 300

Технические характеристики преобразователя

Тип преобразователя: АИН-ШИМ

Фирма-производитель: Англия

Максимальная мощность, кВт: 216

Законы частотного управления

☒ $U/f=const$

☐ $U/f^2=const$

☐ Векторное управление

Вид приводного механизма

☐ Вентилятор

☐ Насос

☐ Демонизатор

☒ Компрессор

Параметры кабеля

Марка кабеля: FULCSWAPVC

Сечение кабеля, мм²: 97

Длина кабеля, м: 96

Тип кабеля

☐ Экранированный

☒ Неэкранированный

Диапазон изменения частот

Число точек расчета: 49

N	f, Гц
1	49,19
2	48,37
3	47,55
4	46,73
5	45,92
6	45,10
7	44,29
8	43,47
9	42,65
10	41,84
11	41,02
12	40,20
13	39,38
14	38,56
15	37,74
16	36,92
17	36,10
18	35,28
19	34,46
20	33,64
21	32,82
22	32,00
23	31,18
24	30,36
25	29,54
26	28,72
27	27,90
28	27,08
29	26,26
30	25,44
31	24,62
32	23,80
33	22,98
34	22,16
35	21,34
36	20,52
37	19,70
38	18,88
39	18,06
40	17,24
41	16,42
42	15,60
43	14,78
44	13,96
45	13,14
46	12,32
47	11,50
48	10,68
49	9,86

Сохранить Загрузить Печать Закрыть

Рис. 1. Исходные данные теплового расчета частотно-регулируемого взрывозащищенного электропривода

По результатам проведенных расчетов определены графики допустимой мощности электродвигателя по нагреву и требуемой мощности на валу приводного механизма при изменении частоты вращения приводного механизма (рис. 2).

По результатам испытаний на электродвигатели, предназначенные для работы с преобразователем, должна быть нанесена дополнительная маркировка. На рис. 3 представлен пример дополнительной маркировки электродвигателя, питаемого от преобразователя частоты, на основании испытаний и тепловых расчетов, представленных на рис. 1 и 2.

изображения индикаторных рисунков отверстий, находящихся на различной глубине в образце, представлены в табл. 1.

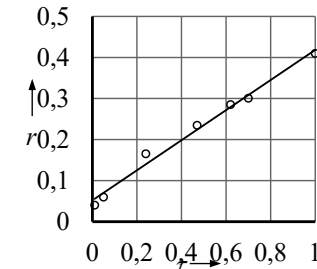


Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента диффузного отражения света от пленки r от коэффициента пропускания света τ для нейтрально серых светофильтров НС – 1, НС – 2, НС – 3, НС – 6, НС – 7, НС – 13

Табл. 1. Изображения индикаторных рисунков отверстий в образце, находящихся на различной глубине

Глубина залегания дефекта, мм	2,5	5	7,5	10
Индикаторные рисунки дефектов на пленке				

Продолжение табл. 1

Глубина залегания дефекта, мм	12,5	15	17,5	20	22,5
Индикаторные рисунки дефектов на пленке					

Как видно из таблицы, индикаторные рисунки несплошностей имеют вид светлых полос, по обе стороны которых располагаются темные полосы. С увеличением глубины залегания несплошности наблюдается увеличение ширины светлой полосы.

Полученные с помощью фотоаппарата цифровые изображения копировали на носитель информации, попиксельно определяли на каждом из них значения интенсивности изображения зеленого цвета, пропорциональные по величине отраженному от магнитонесителя световому

индикаторных рисунков дефектов при контроле в приложенном поле использована установка, изображенная на рис. 1. Она состоит из электромагнита 1 с П-образным сердечником, источника питания электромагнита 2, контролируемого образца 3, пленки, визуализирующей магнитные поля, 4, а также помещенных в корпус оптической системы 5 двояковыпуклой линзы 6, светодиода 7, находящегося в фокусе линзы, и светофильтра 8. Светодиод был запитан от источника 9, стабилизированного по току. Для создания оптической системой параллельного пучка света светодиод располагался в фокусе линзы. Фотографирование индикаторных рисунков дефектов на пленке осуществляли цифровым фотоаппаратом «Canon 600d» 10, который был настроен на чувствительность ISO 800. Обработку полученной информации производили на компьютере.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Чтобы снизить влияние посторонних источников светового излучения на результаты экспериментальных исследований, индикаторные рисунки дефектов фотографировали, защищая зону контроля от внешнего света плотной темной накидкой. Фотоаппарат предварительно был проградуирован при помощи нейтрально серых фильтров. На рис. 2 изображена зависимость изменения коэффициента диффузного отражения света r от пленки от коэффициента пропускания света τ для нейтрально серых светофильтров НС-1, НС-2, НС-3, НС-6, НС-7, НС-13 [1, 5–7].

Эксперименты выполняли следующим образом. На контролируемый образец укладывали визуализирующий магнитные поля магнитоноситель, намагничивали его вместе с образцом постоянным магнитным полем, освещали магнитоноситель параллельным пучком светового излучения зеленого цвета. Поочередно фиксировали с помощью цифрового фотоаппарата сформировавшиеся на магнитоносителе индикаторные рисунки отверстий для каждой глубины залегания в объекте. Полученные

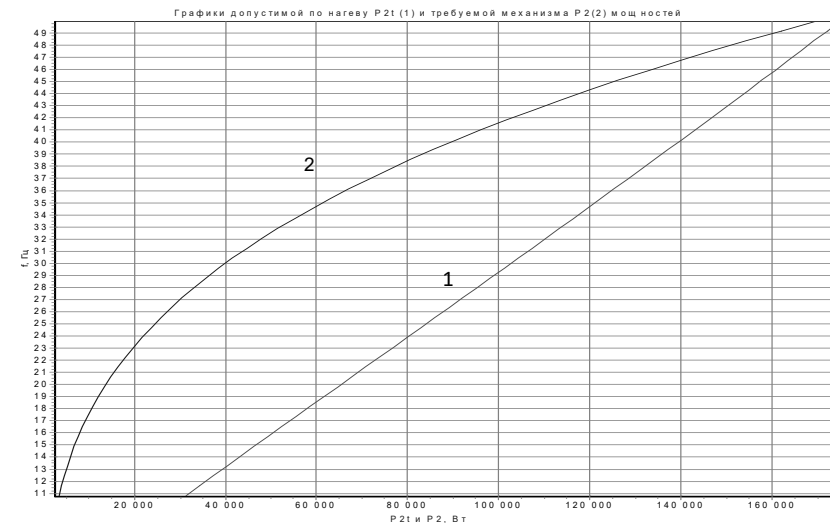


Рис. 2. Графики допустимой мощности электродвигателя по нагреву (1) и необходимой мощности на валу приводного механизма (2) бустерного компрессора при законе управления частотного преобразователя $U/f = \text{const}$

Асинхронный электродвигатель тип BS187120TEFCWP FLP-III (1Ex d IIB T3 Gb) питается от преобразователя частоты типа АИН-ШИМ установленного во взрывобезопасной зоне с диапазоном регулирования скорости 1:4			
175,0 кВт	50 Гц	595 об/мин	6000 В
110,3 кВт	32 Гц	381 об/мин	3845 В
37,3 кВт	12,4 Гц	148 об/мин	1494 В
Преобразователь с ШИМ Режим S1 Нагрузка электродвигателя – компрессор			

Рис. 3. Маркировка электродвигателя, питаемого от преобразователя частоты

Специализированные испытания для оборудования с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка d» заключаются в испытаниях на взрывоустойчивость, которые проводятся на испытательном стенде.

На рис. 4 представлена схема гидравлических испытаний подшипникового щита электродвигателя.

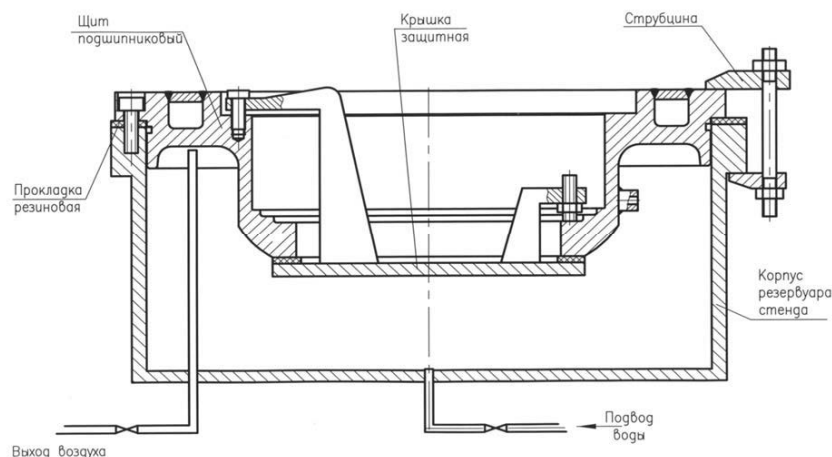


Рис. 4. Схема гидравлических испытаний подшипникового щита электродвигателя

Специализированные испытания для оборудования с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» включают: испытания на искробезопасность с контролем параметров искрозащиты; испытание электрической прочности изоляции; испытание на токопроводящую способность соединений печатных плат; испытание искробезопасного кабеля на растяжение; испытание гальванических элементов и батарей (при наличии); типовые испытания искробезопасных барьеров и шунтов безопасности присоединенного электрооборудования.

НИЛ «Взрывозащищенное электрооборудование» в сотрудничестве с представителями Госпромнадзора при взаимодействии с Госстандартом Республики Беларусь участвуют в деятельности рабочей группы технического регламента ТР ТС 012/2011 с целью совершенствования нормативной базы и межгосударственных стандартов, регламентирующих вопросы проектирования, производства, сертификации и эксплуатации оборудования для взрывоопасных сред.

НИЛ «Взрывозащищенное электрооборудование» выполняет индивидуальные разработки локальных программ и методик испытаний определенного вида взрывозащищенного электрооборудования по договорам с промышленными предприятиями Республики Беларусь (ОАО «Беларуськалий», ОАО «Нафтан», ОАО «Гродно Азот», ОАО «Мозырский НПЗ», РУП «Производственное объединение Белоруснефть»).

путем компьютерной обработки изображений их индикаторных рисунков на пленке, созданы технические средства и методики магнитного контроля деталей и заготовок с поверхностью в состоянии поставки [1–3].

Существенным недостатком разработанного метода дефектоскопии является отсутствие испытательных (контрольных) образцов, позволяющих осуществлять контроль, т. е. определять наличие, производить идентификацию и находить параметры и глубину залегания дефектов при установленных на контрольном образце условиях (режиме намагничивания, угле наблюдения, расположении пленки по отношению к намагничивающему устройству и т. д.), что обеспечит высокую чувствительность и достоверность контроля.

Поэтому разработка контрольных (испытательных) образцов для дефектоскопии ферромагнитных объектов методом визуализирующей магнитные поля пленки является важной и актуальной задачей.

Ранее были проведены исследования по использованию пленки «Flux-detector» для определения качества постоянных магнитов и дефектоскопии ферромагнитных объектов. Настоящая работа выполнена применительно к пленке российского производства ООО «НПК «Проф-Магнит». Предварительно на основе анализа разработанных способов неразрушающего контроля ферромагнитных объектов были определены условия дефектоскопии при использовании визуализирующей магнитные поля пленки, обеспечивающие наибольшую чувствительность контроля. Показано, что для этого необходимо: создать внешнее поле, не допускающее намагничивания пленки в зоне дефекта выше ее магнитного насыщения; освещение пленки пучком параллельных лучей зеленого цвета; чтобы угол наблюдения не превышал $\pm 40^\circ$ к нормали к поверхности объекта; производить фотографирование индикаторных рисунков дефектов на пленке в приложенном поле при постоянной чувствительности матрицы цифровой камеры через 2 с после включения намагничивающего тока в катушке электромагнита, исключая посторонние источники прямого и отраженного светового излучения [4].

Нужно также помнить, что границы области удовлетворительной выявляемости дефектов в изделии зависят от режима намагничивания, величины дефекта, расстояния между полюсами электромагнита, а также от того, находятся электромагнит и пленка с одной или с разных сторон стенки объектов [1].

Образцы для проведения исследований были изготовлены в количестве трех штук из стали Ст 3 размерами $330 \times 40 \times 26$ мм. В первом из них на разной глубине параллельно ребрам 40 мм были выполнены сквозные цилиндрические отверстия диаметром 3 мм. Во втором образце диаметры отверстий были равны 4 мм, а в третьем – 5 мм.

Для экспериментального определения коэффициента диффузного отражения света от пленки, визуализирующей магнитные поля, в зоне

УДК 620.179.14

КОНТРОЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ ПЛЕНКИ

А. В. ШИЛОВ, С. А. БОРОВИКОВА, А. В. КУШНЕР, В. А. НОВИКОВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 620.179.14

CONTROL SAMPLE FOR FLAW DETECTION OF FERROMAGNETIC BY OBJECTS THE VIZUALIZING FILM METHOD

A. V. SHILOV, S. A. BOROVIKOVA, A. V. KUSHNER, V. A. NOVIKOV

Аннотация. Определены условия, обеспечивающие высокую чувствительность контроля ферромагнитных объектов методом визуализирующей пленки. При их соблюдении получены изображения индикаторных рисунков протяженных несплошностей, находящихся на различной глубине, в образце. Построены графики зависимостей, позволяющие определить глубину залегания дефекта и его величину, что в совокупности позволит повысить достоверность определения глубины залегания и величины дефекта в объекте контроля с близкими магнитными свойствами.

Ключевые слова: ферромагнитный объект, дефектоскопия, контрольный образец, дефекты сплошности, глубина залегания, величина дефекта.

Abstract. Conditions providing high sensitivity of ferromagnetic object control by method of visualizing film are determined. If they are observed, images of indicator patterns of extended irregularities located at different depths in the sample are obtained. Dependencies graphs are constructed, which allow to determine depth of defect occurrence and its value, which together will make it possible to increase determination reliability of depth of defect occurrence and value of defect in object of control with close magnetic properties.

Key words: ferromagnetic object, non-destructive testing, test specimen, continuity defects, burial depth, defect size.

Сравнительно недавно разработан магнитный метод контроля ферромагнитных объектов, позволяющий обнаруживать дефекты в намагниченных ферромагнитных объектах с помощью пленки, визуализирующей магнитные поля, по наличию на ней индикаторных рисунков дефектов. Метод контроля обеспечивает одновременную визуализацию магнитных полей рассеяния дефектов на большой площади объекта, слабо подвержен влиянию мешающих факторов, позволяет производить контроль без предварительной механической обработки поверхности объекта. Установлено соответствие между изображениями индикаторных рисунков дефектов на пленке и видом несплошностей. К настоящему времени разработаны теоретические и экспериментальные основы количественной оценки параметров и глубины залегания дефектов

УДК 534.2+620.179.16

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОНЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ С ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТЬЮ

К. Е. АББАКУМОВ, А. В. ВАГИН

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

UDC 534.2+620.179.16

WAVE PROCESSES FEATURES IN MICRO-INHOMOGENEOUS MEDIUMS WITH ORIENTED FRACTURING

K. E. ABBAKUMOV, A. V. VAGIN

Аннотация. Рассмотрены особенности волновых процессов в неоднородных средах с ориентированной системой трещиноподобных несплошностей. В длинноволновом диапазоне для гармонических сигналов в мелкослоистой среде в явном виде получены дисперсионные уравнения для определения фазовых скоростей упругих волн, распространяющихся перпендикулярно и параллельно системе слоев, контакты на границах которых определены в приближении «линейного скольжения». Получены и проанализированы результаты численных решений указанных уравнений в зависимости от параметров микрошероховатости прилегающих поверхностей микротрещин.

Ключевые слова: мелкослоистая среда, фазовые скорости ультразвука, неоднородные граничные условия, «линейное скольжение», ультразвуковые измерения, физико-механические свойства.

Abstract. In the report features of wave processes in inhomogeneous mediums with an oriented system of crack-like discontinuities are considered. Dispersion equations for determining of phase velocities of elastic waves propagating perpendicular and parallel to the system of layers with contacts at the boundaries defined in approximation of «linear slip» are obtained in explicit form for harmonic signals in the long-wave range for a fine-layered medium. The results of numerical solutions of these equations are obtained and analyzed depending on the parameters of micro-roughness of microcracks adjoining surfaces.

Key words: fine-layered medium, phase velocity of ultrasound, inhomogeneous boundary conditions, «linear slip», ultrasonic measurements, physical and mechanical properties.

Расширение номенклатуры используемых материалов опирается на появление новых технологий, что, в свою очередь, сопровождается и появлением новых видов неоднородностей, для обнаружения которых необходимо создавать новые или совершенствовать уже имеющиеся средства контроля. Разработка таких средств контроля должна опираться на физические предпосылки, связанные с особенностями волновых процессов в неоднородных материалах.

Для описания указанных выше структур используются как аналитические, так и численные методы. Использование численных методов при решении задач распространения волн в слоистых средах опирается на применение метода конечных элементов и метода граничных элементов, требующих значительных вычислительных затрат.

Один из возможных вариантов аналитических подходов используется при определении физико-механических характеристик материала слоистой среды и заключается в измерении фазовых скоростей распространения с учетом поляризации упругих волн. Затем, проводя сопоставление характеристик, полученных экспериментальным путем, с известными теоретическими данными, определяются свойства внешних, а также внутренних слоев, которые недоступны для прямых методов контроля [1–3].

Нахождение свойств исследуемой слоистой структуры в данной работе основывается на выводе и последующем решении дисперсионного уравнения для соответствующей волны относительно волнового числа. Решение дисперсионного уравнения дает значение эффективной скорости распространения волны, которая затем используется самостоятельно или подставляется в известные выражения для упругих характеристик материала [4, 5].

Неоднородность слоистой структуры учитывалась путём введения в неоднородные граничные условия (в приближении «линейного скольжения») коэффициентов жесткости – нормального и тангенциального. Неоднородные граничные условия учитывают неполную передачу составляющих упругих смещений при сохранении передачи упругих напряжений [6]. Величина неоднородностей в коэффициентах жесткости моделируется параметром шероховатости. Смоделированная шероховатость определяется средним расстоянием между соседними неоднородностями на контактирующих поверхностях [6, 7].

Предполагалось, что граница несплошности образовалась за счет наличия на поверхности слоев микровыступов, которые описываются величиной шероховатости R_z . Для включения в модель слоистой среды величины шероховатости предлагалось считать, что выступы на поверхности имитируются объектами сферической формы. Тогда для введения шероховатости необходимо учесть параметры формы контактирующих микровыступов: R – радиус замещающего сферического микровыступа; r – средний радиус площади контактного микровыступа, $r \approx 2/3\sqrt{2RR_z}$ (рис. 1) [6, 7]. С учетом введенных приближений, среднее расстояние между выступами будет определяться следующим образом [7]:

$$d = 2\sqrt{2RR_z - R_z^2}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лухвич, А. А. Магнитные толщинометры 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 Национальной академии наук Беларуси». – Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/mtc-3/>.
3. Магнитодинамические и термоэлектрические приборы для измерения толщины покрытий изделий космической техники / В. И. Шарандо [и др.] // Материалы 7 Белорусского космического конгресса, Минск, 24–26 окт. 2017 г.: в 2 т. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2017. – Т. 1. – С. 143–146.

E-mail: lab1@iaph.bas-net.by.

корректировки результатов контроля толщины никеля. Это осуществляется следующим образом. Полученные зависимости закладываются в качестве градуировок в программное обеспечение соответствующих толщиномеров. При контроле промышленного изделия необходимо обоими толщиномерами провести измерения в заданной точке нанесённого покрытия. Обработка полученных сигналов ведётся с использованием градуировок для одинакового состояния структуры никеля. Результат контроля должен считаться достоверным, если имеет место совпадение значений толщины для обоих толщиномеров при выбранных на них градуировках. При отсутствии совпадения значений толщины на индикаторах толщиномеров необходимо для обработки сигналов на их обоих выбрать градуировки, соответствующие другому состоянию структуры никеля.

Например, ведётся контроль толщины никеля с неизвестным состоянием структуры. Выполнены измерения информативных сигналов обоими рассмотренными толщиномерами. Сигналы приборов МТЦ-3-1 и МТЦ-3-2 составляют соответственно 2000 и 1700 усл. ед. На обоих толщиномерах включены градуировки, соответствующие отождествлённому никелю (кривая 1 рис. 1 для МТЦ-3-1 и кривая 1 рис. 2 для МТЦ-3-2). При этом прибор МТЦ-3-1 выводит на свой индикатор значение толщины покрытия 200 мкм, а прибор МТЦ-3-2 – значение толщины покрытия 300 мкм. Значения не совпадают, и, следовательно, оба являются ошибочными. Необходим переход к градуировкам, соответствующим другому состоянию структуры никеля. В данном случае это зависимости для деформированного материала (кривая 2 рис. 1 для МТЦ-3-1 и кривая 2 рис. 2 для МТЦ-3-2). При данных градуировках оба толщиномера выводят на свои индикаторы одинаковое значение толщины покрытия 400 мкм. Оно и является действительным для данного изделия. Кроме того, установлено состояние структуры никеля (степень присутствующих в нём напряжений).

Могут быть изучены другие степени деформации с записью в память прибора нескольких кривых или соответствующей номограммы.

Таким образом, в результате выполненной работы показано, что контроль толщин различающихся по структуре никелевых пластинок и гальванических никелевых покрытий на немагнитных основаниях может осуществляться при совместном использовании магнитодинамических толщиномеров МТЦ-3-1 и МТЦ-3-2. При этом достаточно несложным путём могут быть устранены погрешности, связанные с присутствием в никеле внутренних напряжений, а также дана оценка уровня этих напряжений.

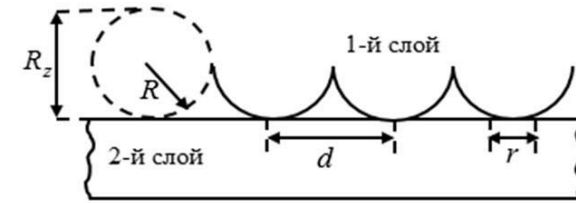


Рис. 1. Модель микровыступов сферической формы на границе слоев, образующих трещиноватый массив среды

Для примера зависимость нормального коэффициента жесткости, определяемого из [6], от величины шероховатости приведена на рис. 2.

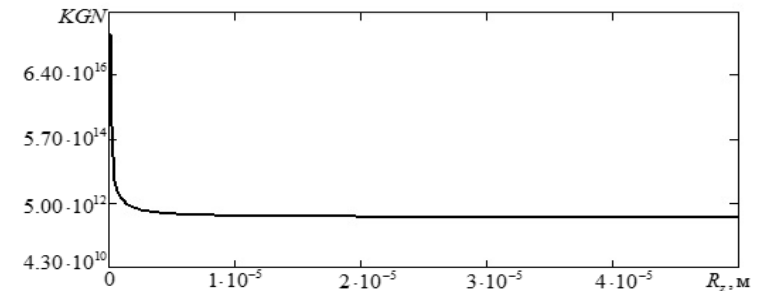


Рис. 2. Зависимость нормального коэффициента жесткости от величины шероховатости

Для модели слоистой среды на рис. 3 будем рассматривать распространение продольной волны при двух вариантах геометрии распространения – параллельно и перпендикулярно слоям.

На границе между слоями для компонент $\xi_x = \xi_{\alpha x} + \xi_{\beta x}$; $\xi_z = \xi_{\alpha z} + \xi_{\beta z}$; σ_{xz} ; σ_{zz} должны выполняться условия неоднородности при $z = 0$ [8]:

$$\begin{aligned} \xi_x(0) &= \xi_x(0^-) - \sigma_{xz}(0^-)/KGT; \quad \xi_z(0) = \xi_z(0^-) - \sigma_{zz}(0^-)/KGN; \\ \sigma_{xz}(0) &= \sigma_{xz}(0^-); \quad \sigma_{zz}(0) = \sigma_{zz}(0^-), \end{aligned} \quad (1)$$

а также условия периодичности, которые описывают равенство компонент упругих смещений и механических напряжений в первой среде при $z = a$ и при $z = b$ – во второй (символы со штрихом):

$$\xi_x(a) = \xi_x(b); \quad \sigma_{xz}(a) = \sigma_{xz}(b); \quad \xi_z(a) = \xi_z(b); \quad \sigma_{zz}(a) = \sigma_{zz}(b). \quad (2)$$

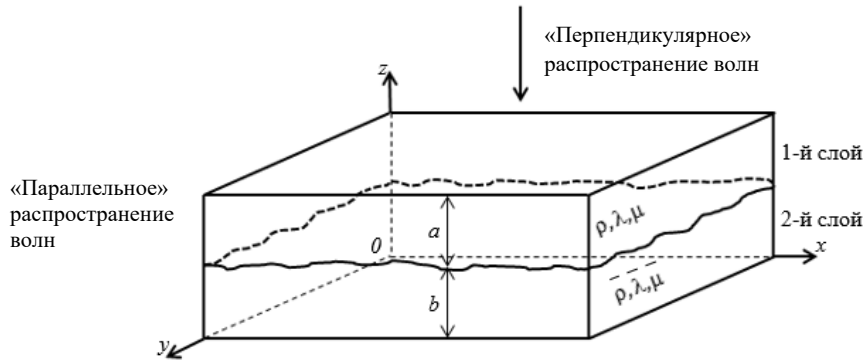


Рис. 3. Модель слоистой структуры

С учетом (1), (2) дисперсионное уравнение для продольной волны, распространяющейся в слоистой неоднородной среде параллельно слоям структуры, получило вид:

$$4(\mu - \bar{\mu})^2 X \bar{X} \left(1 - \frac{\bar{k}_i^2 \operatorname{ctg}(\bar{\beta}b/2)}{KGN}\right) + \varpi^2 \bar{\rho} \left(\varpi^2 \bar{\rho} / k^2 - 4(\mu - \bar{\mu})\right) \times$$

$$\times \bar{X} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta a}{2}\right) \left(1 - \frac{\bar{k}^2 \operatorname{ctg}(\bar{\alpha}b/2)}{KGT}\right) + \varpi^2 \bar{\rho} \left(\frac{\varpi^2 \bar{\rho}}{k^2} + 4(\mu - \bar{\mu}) + \frac{\bar{\rho} \bar{k}^2 \operatorname{ctg}(\bar{\alpha}b/2)}{KGT}\right) \times$$

$$\times X \operatorname{tg}\left(\frac{\bar{\beta}b}{2}\right) - \frac{\varpi^4 \bar{\rho} \bar{\rho}}{k^2 \bar{k}_i^2} \left(Y \operatorname{tg}\left(\frac{\bar{\beta}b}{2}\right) + \bar{Y} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta a}{2}\right)\right) \left(1 - \frac{\rho \bar{k}_i^2 \operatorname{ctg}(\bar{\alpha}b/2)}{KGN}\right) = 0, \quad (3)$$

где

$$\bar{Y} = k^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\bar{\beta}b}{2}\right) + \alpha \bar{\beta} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha a}{2}\right); \quad X = k^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta a}{2}\right) + \alpha \beta \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha a}{2}\right);$$

$$\bar{X} = k^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\bar{\beta}b}{2}\right) + \bar{\alpha} \bar{\beta} \operatorname{tg}\left(\frac{\bar{\alpha}b}{2}\right); \quad Y = k^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta a}{2}\right) + \bar{\alpha} \bar{\beta} \operatorname{tg}\left(\frac{\bar{\alpha}b}{2}\right). \quad (4)$$

Из рисунка следует, что прибор МТЦ-3-1 обеспечивает однозначные зависимости показаний от толщины как для отожжённых, так и деформированных никелевых образцов, но не позволяет создать для них единую градуировку. Сигналы этого прибора, полученные на материале с напряжённой структурой, оказываются значительно более низкими. При практической толщинометрии для предотвращения погрешностей необходимо определять состояние никеля и использовать соответствующую ему градуировочную кривую.

На рис. 2 представлены зависимости показаний магнитного толщиномера МТЦ-3-2 от толщины никелевых образцов в отожжённом и деформированном до 33 % состояниях.

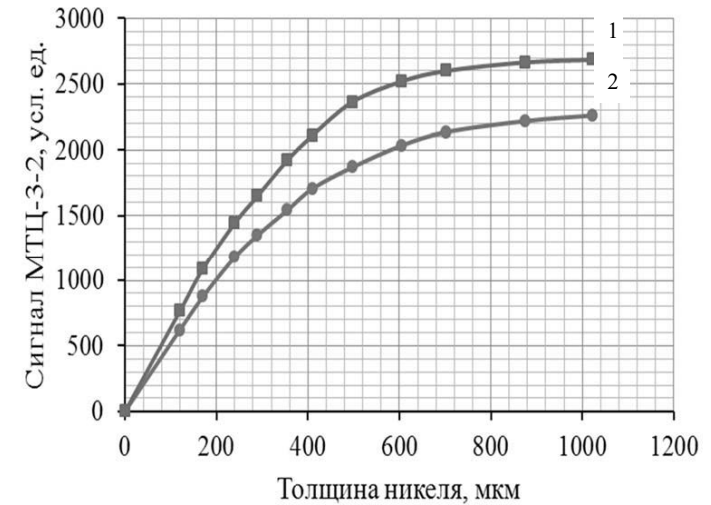


Рис. 2. Зависимости показаний толщиномера МТЦ-3-2 от толщины никелевых образцов в отожжённом (1) и деформированном (2) состояниях

Рисунок показывает, что имеющий магнит большего диаметра толщиномер МТЦ-3-2 позволяет обеспечить чувствительность к покрытиям более широкого диапазона толщин, чем снабжённый магнитом малого диаметра толщиномер МТЦ-3-1. Однако и в этом случае существует сильная зависимость показаний от состояния структуры никеля. При этом, как и на предыдущем рисунке, измеряемый прибором магнитный поток для образцов деформированного никеля оказывается существенно меньшим, чем для образцов после отжига.

Совместный анализ рис. 1 и 2 позволяет сделать вывод о возможности использования характерных для них различий в ходе кривых для взаимной

Табл. 1

Элемент	Ni	Co	Cu	Fe	Si	S	C	Pb
%	99,77	0,021	0,007	0,008	0,0009	0,0005	0,0041	0,0003

Продолжение табл. 1

Элемент	Sb	As	Sn	Bi	P	Zn	Cd	Mg	Mn
%	<0,0005	0,0005	–	–	<0,001	0,0006	–	<0,001	–

Отожжённые в течение 3 ч на воздухе при 700 °С никелевые заготовки разных толщин подвергли прокатке со степенью деформации 33 %, затем отрезанные от них части снова отожгли при 700 °С в течение 1 ч. Размер каждого образца составил 32 × 22 мм. В итоге у одной серии образцов внутренние напряжения отсутствовали, а у другой они оказались близкими к возможным на практике.

Указанными толщиномерами на образцах проведены измерения сигналов, снятых с индукционных катушек. Они фиксировались в условных единицах, без пересчёта по каким-либо градуировкам в значения толщин. Для повышения наглядности условные единицы обоих приборов с помощью коэффициента усиления приведены к единым значениям, характеризующим область насыщения для отожжённого никеля при его толщине около 1000 мкм.

На рис. 1 представлены зависимости показаний магнитного толщиномера МТЦ-3-1 от толщины никелевых образцов в отожжённом и деформированном до 33 % состояниях.

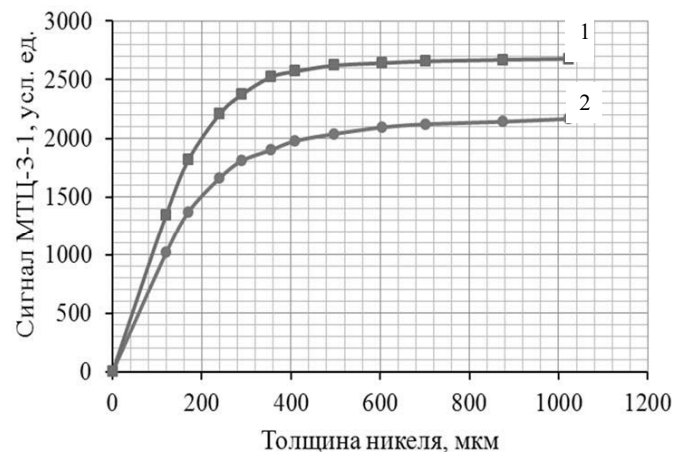


Рис. 1. Зависимости показаний толщиномера МТЦ-3-1 от толщины никелевых образцов в отожжённом (1) и деформированном (2) состояниях

Уравнение (4) определяет волновое число k , а соответственно, и скорость для эффективной продольной волны при любых значениях параметров слоев в рассматриваемой периодической структуре «сталь–графит». Уравнение (4) описывает распространение волны в неоднородной среде, но если устремить коэффициенты жесткости $KGT, KGN \rightarrow \infty$, что соответствует сплошному контакту на границе между средами при коэффициенте перфорации, стремящемся к 1, то получим дисперсионное уравнение, описывающее распространение продольной волны в трансверсально-изотропной среде с учетом исправленных неточностей [1].

Теоретические параметры для материалов сталь и графит, необходимые в дальнейшем для построения всех графических зависимостей, представлены в табл. 1 [4].

Табл. 1

Параметры	Материал	
	сталь	графит
f , Гц	$1 \cdot 10^6$	
h , м	$1 \cdot 10^{-3}$	
c_l , м/с	$5,92 \cdot 10^3$	$3,39 \cdot 10^3$
c_t , м/с	$3,23 \cdot 10^3$	$0,82 \cdot 10^3$
ρ , кг/м ³	$7,80 \cdot 10^3$	$2,26 \cdot 10^3$
λ , Па	$11,1 \cdot 10^{11}$	$2,28 \cdot 10^{11}$
μ , Па	$8,14 \cdot 10^{10}$	$0,15 \cdot 10^{10}$

Построение выполнялось при частоте ультразвука 1 МГц, шероховатости границ слоистой среды $R_z = 40$ мкм, общей толщине слоистой структуры 1 мм.

Значение скорости возрастает во всем диапазоне изменения относительной толщины слоя. Для случая однородной среды вид зависимости остается таким же, но значения скорости несколько возрастают, что связано с распространением волны без потерь энергии на рассеяние на структурных неоднородностях среды.

После применения всех аналогичных операций находилось дисперсионное уравнение для продольной волны, распространяющейся в неоднородной среде перпендикулярно слоям структуры «сталь–графит» [5]:

$$\cos(k_1 a) \cos(\bar{k}_1 b) \left[\frac{(\lambda + 2\mu)k_1}{KGT} + 1 \right] + \frac{1 - \chi_1^2}{2\chi_1} \sin(k_1 a) \sin(\bar{k}_1 b) \left[\frac{(\bar{\lambda} + 2\bar{\mu})\bar{k}_1}{KGN} - 1 \right] - \cos(k(a + b)) = 0, \quad (5)$$

где $\chi_1 = (\bar{\lambda} + 2\bar{\mu})\bar{k}_1 / (\lambda + 2\mu)k_1$.

Вычисления по (5) проводились для ранее указанных значений параметров, а их результаты представлены на рис. 5. Видно, как и на рис. 4, что величина скорости возрастает во всем диапазоне изменения относительной толщины слоя.

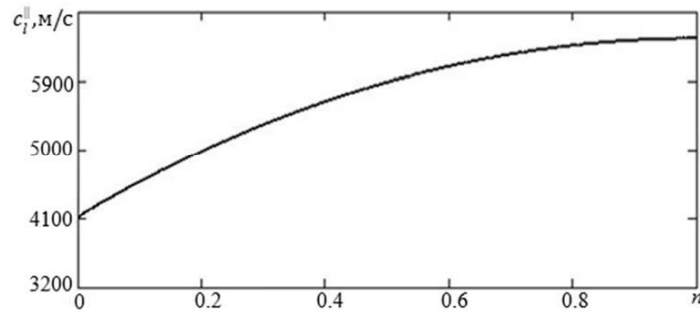


Рис. 4. Зависимость скорости продольной волны от относительной толщины слоя при распространении продольной волны параллельно плоскостям слоев

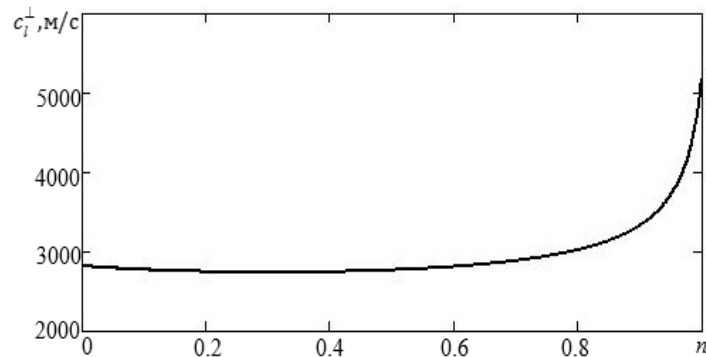


Рис. 5. Зависимость скорости продольной волны от относительной толщины слоя при перпендикулярном распространении

преобразователях приборов используются стержневые магниты различных размеров из материала NdFeB с энергией от 15 до 180 мДж.

Выполненные исследования, в частности, в рамках программ Союзного Государства «Космос-НТ» и «Мониторинг-СГ», показали высокую эффективность применения магнитодинамических приборов для контроля толщин гальванических никелевых покрытий на основаниях из бронзы, используемых в ракетной технике [3]. В то же время выявлена зависимость результатов контроля от условий нанесения и дальнейшей обработки никелевого покрытия. Присутствующие в никеле внутренние структурные напряжения, возникшие в процессе нанесения покрытия, а также при последующей механической обработке (выравнивание поверхности и т. п.), значительно снижают измеряемые приборами сигналы. При этом было установлено, что сигнал на гальванически осаждённом никеле имеет такую же величину, как и на никелевых пластинках аналогичной толщины, подвергнутых деформации до 30...35 %. При наличии в технологических картах операций последующей термической обработки указанные напряжения могут быть сведены к минимуму или неким промежуточным значениям. Это приводит к изменению магнитных характеристик никеля, что вызывает появление погрешностей при измерениях толщины магнитными толщиномерами. С усилением намагничивающего поля (энергия магнита 180 мДж) происходит сближение зависимостей измеряемого сигнала от толщины для отожжённого и деформированного никеля, однако и в этом случае погрешности полностью не устраняются. Кроме того, измеряемый сигнал начинает испытывать влияние близлежащих ферромагнитных объектов. Поэтому актуальной задачей является разработка технологий толщинометрии указанных покрытий с учётом структуры никеля; измерения предпочтительно вести приборами с относительно невысокой энергией магнита.

Целью работы являлось создание методики контроля никелевых покрытий на немагнитных основаниях, обеспечивающей получение информации о структурном состоянии нанесённого материала и позволяющей снизить погрешности определения его толщины.

Для достижения поставленной цели было решено использовать комплексные измерения с помощью двух модификаций магнитодинамического толщиномера МТЦ-3: прибора МТЦ-3-1, снабжённого магнитом диаметром 3 мм (энергия около 15 мДж) и прибора МТЦ-3-2, снабжённого магнитом диаметром 5 мм (энергия около 45...55 мДж).

Покрытия на немагнитном основании имитировались пластинками соответствующей толщины, изготовленными из никеля марки **Н-1у** производства комбината «Североникель» со следующим содержанием химических элементов, представленных в табл. 1.

УДК 620.179.1

ОТСТРОЙКА ОТ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ПРИ КОНТРОЛЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ТОЛЩИНОМЕРАМИ ТИПА МТЦ**В. И. ШАРАНДО, А. В. ЧЕРНЫШЁВ, Н. В. КРЕМЕНЬКОВА**Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.1

ELIMINATION THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE DURING CONTROL OF THE NICKEL COATINGS WITH HELP THICKNESS METER MTC TYPE**V. I. SHARANDO, A. V. CHERNYSHEV, N. V. KREMENKOVA**

Аннотация. Обоснована возможность применения серийных приборов МТЦ-3-1 и МТЦ-3-2 для измерения толщины никелевых покрытий на неферромагнитных основаниях с учётом условий их нанесения и термической обработки. Предложена методика устранения погрешностей контроля, связанных с различиями в структуре никеля, а также оценки уровня механических напряжений в контролируемых покрытиях.

Ключевые слова: никелевые покрытия, толщина покрытий, степень деформации, магнитные толщинометры, диапазон измерений, погрешности контроля.

Abstract. The possibility of using serial devices MTC-3-1 and MTC-3-2 for measuring the thickness of nickel coatings on non-ferromagnetic substrates is substantiated, taking into account the conditions of their application and heat treatment. The proposed method of eliminating errors in control, arising from differences in the structure of nickel, as well as for evaluating the level of mechanical stress in controlled coating.

Key words: nickel coatings, coating thickness, degree of deformation, magnetic thickness meter, measurement range, errors of control.

В ИПФ НАН Беларуси разработан и серийно выпускается ряд приборов, основанных на магнитодинамическом принципе измерений и используемых для толщинометрии немагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях и никелевых покрытий на немагнитных основаниях [1–3]. Для решения задач в области контроля толщин покрытий широкое применение находят магнитные толщинометры МТЦ-3, получившие сертификат Республики Беларусь об утверждении типа средств измерений № 6932 и декларацию об их соответствии требованиям технических регламентов Таможенного союза № ТС ВУ/112 11.01. ТР020 003 16640. Они основаны на регистрации изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей стержневой магнит, при его контакте и затем удалении от ферромагнетика; при этом уровень измеряемого сигнала зависит от величины немагнитного зазора, т. е. толщины покрытия (хром, цинк, лак, краска и т. п.). В случае нанесённых на неферромагнетик никелевых покрытий измеряемый сигнал характеризует изменение количества магнитного материала в рабочей зоне преобразователя с изменением толщины покрытия. В первичных

Для случая трансверзально-изотропной среды вид зависимости остается таким же, но значения скорости несколько возрастают, что связано с распространением волны без потерь энергии на рассеяние на структурных неоднородностях среды.

Полученные зависимости представляют интерес в качестве физических предпосылок интерпретации результатов ультразвуковых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бреховских, Л. М.** Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. – Москва: Наука, 1973. – 340 с.
2. **Шермергор, Т. Д.** Теория упругости микroneоднородных сред / Т. Д. Шермергор. – Москва: Наука, 1977. – 400 с.
3. **Викторов, И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – Москва: Наука, 1981. – 287 с.
4. **Аббакумов, К. Е.** Волновые процессы в слоистой микroneоднородной среде с неоднородными граничными условиями / К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 5. – С. 12–18.
5. **Аббакумов, К. Е.** Дисперсионное уравнение для продольной волны в слоистой среде с неоднородными граничными условиями при различных направлениях распространения / К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 22–30.
6. **Аббакумов, К. Е.** Рассеяние плоских упругих волн на микрошероховатой границе раздела твердых сред / К. Е. Аббакумов // Дефектоскопия. – 2017. – № 7. – С. 3–13.
7. Справочник по триботехнике: в 3 т. / Под общ. ред. М. Хебды. – Москва: Машиностроение, 1984. – 200 с.
8. **Floquet, M. G.** Sur les equations differentielles lineaires a coefficients periodiques / M. G. Floquet // Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure. – 1983. – Vol. 12. – P. 47–88.

E-mail: keabbakumov@etu.ru; keabbakumov51@mail.ru.

УДК 534.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ОТ ГРАНИЦЫ СРЕД С ДИСКРЕТНО ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ФАЗОЙ РАССЕЯННОЙ ВОЛНЫ

*А. Р. БАЕВ¹, Н. В. ЛЕВКОВИЧ², М. В. АСАДЧАЯ¹, О. С. СЕРГЕЕВА³,
Г. И. РАЗМЫСЛОВИЧ¹*

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

²Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

³Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 534.16

SIMULATION OF LONGITUDINAL WAVE SCATTERING FROM THE BOUNDARY OF A MEDIUM WITH A CHANGING PHASE OF REFLECTED WAVES

*A. R. BAEV, N. V. LEVKOVICH, M. V. ASADCHAYA, O. S. SERGEEVA,
G. I. RAZMYSLOVICH*

Аннотация. Разработана экспериментальная установка и проведено моделирование полей рассеянных продольных волн границей сцепления материалов с дефектной областью в форме круга и полуплоскости при перемещении через нее пятна акустического луча. Определены оптимальные условия для обнаружения слабо отражающих звук дефектов. Максимальная чувствительность при их выявлении достигается путем приема рассеянных волн под углами, лежащими в окрестности углов экстремумов первого порядка диаграммы направленности поля рассеяния. Выполнено сравнение экспериментальных и расчетных данных.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, поле рассеяния, дефекты сцепления, фаза волны.

Abstract. An experimental setup has been developed and the fields of scattered longitudinal waves are simulated by the adhesion boundary of materials with a defective area in the form of a circle and a half-plane when an acoustic beam spot moves through it. The optimal conditions for the detection of weakly reflecting sound defects have been determined. The maximum sensitivity for their detection is achieved by receiving scattered waves at angles lying in the vicinity of the extremum angles of the first order of the scattering field pattern. Comparison of calculation and experimental data is performed.

Key words: ultrasonic testing, stray field, adhesion defects, wave phase.

Достаточно часто при акустическом контроле качества сцепления материалов со слабо выявляемыми дефектами (в особенности дефектами слипания) [1–3] небольшие изменения амплитуды или фазы φ волн, отраженных от дефектной и бездефектной границы материалов, не позволяют использовать их в качестве информативных параметров. Это обусловлено «традиционным подходом» и методическими особенностями

По выбранной таким способом калибровочной кривой далее и ведётся определение d при работе толщиномера на низкой частоте.

На практике количество калибровочных кривых ограничено. Предположим, у нас имеются две калибровочные кривые, приведенные на рис. 1. При высокой частоте измерений им соответствуют показания φ_1 и φ_2 , приведенные на рис. 2. Для определения калибровочной кривой для образца, у которого $\varphi_1 < \varphi_n < \varphi_2$, необходимо проанализировать характер изменения калибровочных кривых 1 и 2 при изменении φ от φ_1 до φ_2 и определить калибровочную зависимость для образца со значением φ_n . Данная задача наиболее просто решается при линейном характере зависимости φ от d .

Таким образом, на основе выполненных экспериментальных измерений толщины хромовых покрытий на никелевом основании фазовым способом показано, что повышение точности таких измерений возможно при учёте величины удельной электропроводности хромового покрытия. Такой способ контроля реализован в разработанном в ИПФ НАН Беларуси двухчастотном портативном вихретоковом толщиномере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дорофеев, А. Л.** Индукционная толщинометрия / А. Л. Дорофеев, А. И. Никитин, А. Л. Рубин. – 2-е изд. – Москва: Металлургия, 1978. – 184 с.
2. **Рубин, А. Л.** Реакция ферромагнитного полупространства с немагнитным слоем на датчик накладного типа / А. Л. Рубин, В. Г. Пахомов // Дефектоскопия. – 1974. – № 3. – С. 36–41.
3. **Ноймайер, П.** Вихретоковый фазовый метод измерения толщины гальванических покрытий / П. Ноймайер // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 2 (40). – С. 29–30.
4. **Brenner, A.** Physical Properties of Electrodeposited Chromium / A. Brenner, P. Burkhead, C. Jennings // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1948. – Vol. 40. – P. 31–59.
5. **Brittain, C. P.** The Influence of Annealing on the Structure and Hardness of Electrodeposited Chromium / C. P. Brittain, C. C. Smith // The International Journal of Surface Engineering and Coating. – 1954. – Vol. 31. – P. 146–152.
6. **Соболев, В. С.** Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.
7. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий / В. А. Сясько [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 10. – С. 25–36.

E-mail: lab5@iaph.bas-net.by.

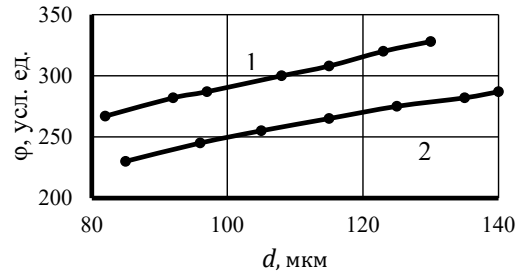


Рис. 1. Зависимость φ от d при $f = 350$ кГц: 1 – комплект образцов № 1; 2 – комплект образцов № 2

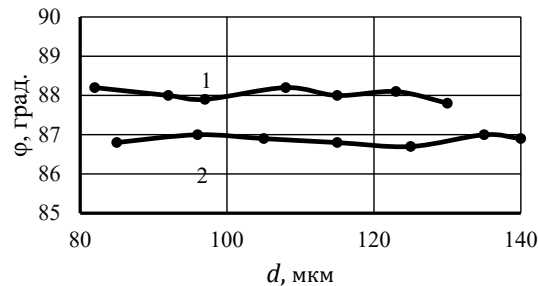


Рис. 2. Зависимость φ от d при $f = 14$ МГц: 1 – комплект образцов №1; 2 – комплект образцов № 2

На рис. 2 смещение линий 1 и 2 друг относительно друга связано с различием образцов по σ и практически не наблюдается зависимости φ от d . Для двух рассмотренных комплектов образцов путём измерений на частоте 14 МГц установлено, что $\sigma_1 > \sigma_2$. Удельную электропроводность материалов покрытий удаётся здесь выделить в определённый и важный для дальнейшего применения информативный параметр. При этом фазовое измерение числовых значений удельной электропроводности хромового покрытия не осуществлялось ввиду отсутствия аттестованных образцов с различными значениями электропроводностями хрома. При необходимости для определения удельной электропроводности хрома можно использовать выпускаемые серийно измерители импеданса [7].

Методика работы двухчастотного толщиномера состоит в следующем. Вначале определяют показание толщиномера φ_n при высокой частоте поля возбуждения. Затем выбирают из определенных предварительно при низкой частоте калибровочных зависимостей ту, что была получена на образцах, у которых на высокой частоте показание толщиномера также равнялось φ_n .

реального (массового) ультразвукового контроля объектов машиностроительной, химической промышленности и др.

Предложенный в [4, 5] метод позволяет существенно повысить чувствительность и информативность ультразвукового контроля. Он заключается в выборе таких средств и создания условий контроля, при которых в результате интерференции акустических лучей (АКЛ), одновременно рассеянных дефектной S_D и бездефектной S_{ND} граничной поверхности сцепления материалов, будут наблюдаться весьма значительные изменения амплитуды сигнала. Анализируя фазовые параметры волн, отраженных от дефектной и бездефектной поверхности [6], определяют такие углы α падения УЗК на контролируемую поверхность, при которых разница фаз θ между отраженными волнами указанных АКЛ максимальная. При этом создаются необходимые условия «усиления» интерференционной картины. С другой стороны, подбираются такие углы приема поля рассеяния в экваториальной ψ и меридианной плоскости φ , при которых наблюдаются наиболее значимые по величине колебания амплитуды поля рассеянных волн, наблюдаемые при перемещении источника УЗК (ПЭП) относительно дефектной области площадью S_D . Они характеризуются амплитудным параметром $\Delta A^* = |A(\psi, \varphi) - A_{0i}| / A_{0i}$, где величина амплитуды сигнала A_{0i} соответствует случаю отражения УЗК от бездефектной поверхности. В [6] для обнаружения слабо выявляемых дефектов предложено выбирать углы приема φ рассеянных волн, лежащих в меридианной плоскости и в окрестности минимумов и максимумов первого и второго порядка диаграммы направленности поля рассеяния, т. е. при $\varphi \in \{\varphi_{\min 1,2}, \varphi_{\max 1,2}\}$.

Для подтверждения результатов теоретического анализа акустического тракта рассматриваемого метода контроля были проведены экспериментальные исследования, методические особенности которых поясняются на рис. 1. В этом случае создаются условия рассеяния нормально падающих на поверхность с дефектами волн, моделируемые путем помещения на пути распространения УЗК тонких плексигласовых пластин, имитирующих дефектную область в виде круглого пятна, полубесконечной поверхности и др. Они плотно прижимаются через контактную смазку к поверхности подложки, имеющей форму полусферы, выполненной также из плексигласа. Смещение оси пятна АКЛ относительно имитатора дефекта производится путем перемещения указанной пластины вдоль направления x . Фазовая задержка рассеянной от дефектной области волны создается путем выполнения на пластине с заданной геометрией контура выступов высотой Δh . При этом величина фазовой задержки $\varphi = f \frac{2\pi\Delta h}{C_{\text{п}}} (1 - \frac{C_{\text{в}}}{C_{\text{п}}})$, где

$C_{\text{в}}$ и $C_{\text{п}}$ – скорости УЗК в воде и плексигласе. В случае же моделирования квазилинейного изменения фазы волны на характерном участке $x_2 \geq x \geq x_1$

$$\varphi(x) = 2\pi f \frac{(x-x_1)tg\omega}{C_{II}} \left(1 - \frac{C_B}{C_{II}}\right), \text{ где } \omega - \text{ угол наклона наружной}$$

поверхности пластины с имитатором дефектов. Источником УЗК служит пьезопластина радиусом $r = 6,5$ мм с рабочей частотой $f = 1,5$ МГц. Приемный ПЭП, выполненный с возможностью измерения полей в различных плоскостях сечения подложки полусферы, содержит пьезопластину радиусом $r = 1,7$ мм и находится в дальней зоне. Электронная аппаратура, используемая для возбуждения и приема УЗК, описана в [6].

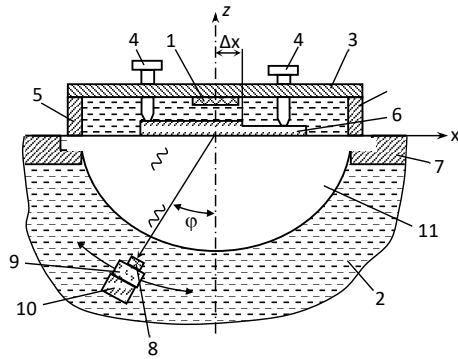


Рис. 1. Схема эксперимента для измерения полей рассеяния УЗК на моделируемой границе сцепления материалов с дискретной и плавно изменяющейся фазой: 1 – ПЭП; 2 – вода со смачивающими добавками; 3 – основание; 4 – крепежные винты; 5 – опорные стойки; 6 – имитатор граничных условий; 7 – базовая опора; 8 – приемный ПЭП; 9 – основание; 10 – державка на вращающейся рамке; 11 – полусферический образец или имитатор тела-подложки

Отметим, что в качестве амплитуды опорного сигнала поля рассеяния при приеме УЗК под нулевым углом $\varphi = \varphi_{\max 0}$ (что характерно для традиционного способа) берется амплитуда сигнала, отраженного от бездефектной поверхности ($A_i = A_0$). При приеме же рассеянных сигналов под углами, соответствующими минимуму и максимуму 1-го порядка ($\varphi_{\min 1}$ и $\varphi_{\max 1}$), опорным сигналом служит амплитуда отраженного сигнала $A_i = A_{\max 1}$, измеренного по углом $\varphi \rightarrow \varphi_{\max 1}$ в отсутствие дефекта.

Характерные результаты экспериментальных исследований и расчетов приведены на рис. 2 и 3. Так, на рис. 2 приведены зависимости максимального изменения относительной амплитуды акустического сигнала, принимаемого под углами экстремумов нулевого и первого порядка, где диапазон варьируемого сдвига фазы, отраженной от дефектной поверхности волны, составляет $\theta = 0 - \pi$. При этом сравнение проводится для случая, когда площадь дефектной поверхности S_D в ~ 10 раз меньше площади

преобразователя, частоты f его тока возбуждения (изменяющегося по гармоническому закону), при которых фаза φ вносимого в преобразователь напряжения линейно зависит от толщины контролируемого покрытия [1–2]. При неизменных остальных параметрах φ зависит от удельной электропроводности σ покрытия. Известно, что электролитически осажденный слой хрома характеризуется непостоянством величины σ [4]. Она может изменяться также при следующей после осаждения термической обработке ввиду сильной зависимости размеров зерен хрома от температуры, так как на границах зерен могут образовываться оксиды хрома. В покрытии могут возникать микротрещины [5]. Следовательно, при определении толщины d хромового покрытия по измерениям φ можно получить большие погрешности, если калибровочная кривая строилась по измерениям на эталонах с другими значениями σ . Один из вариантов устранения таких погрешностей рассмотрен в данной работе.

Для определения удельной электропроводности хрома измерения φ проводятся при двух различных частотах поля возбуждения. При «низкой» частоте измеряется толщина покрытия, а при «высокой» – его удельная электропроводность или величина, зависящая от нее [1]. Глубина проникновения высокочастотного поля в материал покрытия должна быть значительно меньше наименьшей его толщины, встречающейся при контроле.

Экспериментальные измерения проводились разработанным двухчастотным толщиномером, основанным на фазовом способе контроля. Применяемый в нем фазометр позволяет измерять фазовый сдвиг между двумя гармоническими сигналами с разрешающей способностью $\pm 0,05^\circ$. При проведении измерений на «высокой» и «низкой» частоте применяются два различных по конструкции накладных преобразователя.

Измерения были проведены на двух комплектах образцов, вырезанных из реального изделия космической техники. Образцы комплектов № 1 и 2 различались тем, что были изготовлены на разных предприятиях, технологии изготовления изделий на обоих предприятиях считались одинаковыми. Однако, по оценочным определениям, материалы покрытий различались по σ . В комплекте № 1 все образцы имели близкие значения удельной электропроводности хрома, среднее значение которой составляло σ_1 . В комплекте № 2 все образцы также имели близкие значения удельной электропроводности хрома, среднее значение которой составляло σ_2 , при этом $\sigma_1 > \sigma_2$. Результаты измерений при $f = 350$ кГц приведены на рис. 1, при $f = 14$ МГц – на рис. 2.

Из рис. 1 следует, что без учета удельной электропроводности хромового покрытия погрешность определения его толщины может быть значительной.

УДК 620.179.14

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА НИКЕЛЕВОМ ОСНОВАНИИ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

А. В. ЧЕРНЫШЕВ, И. Е. ЗАГОРСКИЙ, В. И. ШАРАНДО

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

CONTROL OF THICKNESS OF THE CHROME COATING ON THE NICKEL BASE USING EDDY CURRENTS METHOD

A. V. CHERNYSHEV, I. E. ZAGORSKIY, V. I. SHARANDO

Аннотация. Рассмотрен вопрос контроля толщины хромового покрытия вихретоковым методом. Приведены результаты экспериментальных измерений толщины хромового покрытия на образцах с различной удельной электропроводностью. Показано, что для повышения точности измерений толщины хромового покрытия фазовым способом необходимо учитывать величину его удельной электропроводности.

Ключевые слова: хромовые покрытия, никелевые покрытия, толщина покрытий, вихретоковые толщинометры, удельная электропроводность, погрешности контроля.

Abstract. The issue of controlling the thickness of the chrome coating by the eddy current method is considered. The results of experimental measurements of the thickness of the chromium coating on samples with different electrical conductivity are presented. It is shown that in order to increase the accuracy of measuring the thickness of the chrome coating by the phase method, it is necessary to take into account the value of its electrical conductivity.

Key words: chrome coatings, nickel coatings, coatings thickness, eddy current thickness gauges, conductivity, errors of control.

При изготовлении некоторых деталей космической техники применяют гальваническое хромирование их поверхности электролитическим методом. При этом толщина покрытия должна находиться в определенном интервале ее значений. В частности, при производстве камер сгорания ракетных двигателей на их бронзовый корпус наносят последовательно слои никеля и хрома. Первый из них является ферромагнетиком, второй немагнитен. Для определения толщины хрома могут быть использованы различные физические методы, однако при этом возникают проблемы, связанные с колебаниями свойств используемых материалов в зависимости от условий их нанесения. Соответственно, каждый метод толщинометрии имеет свой объем и характер погрешностей.

Вопросу контроля толщины хромового покрытия на ферромагнитном основании вихретоковым методом посвящено большое количество научных публикаций, разработано много типов вихретоковых толщинометров [1–3]. Для проводящих неферромагнитных покрытий на ферромагнитном основании возможно подобрать такие параметры накладного вихретокового

пятна **АкЛ** $S_0 = S_{ND} + S_D$, а также $S_D > S_0$. Из расчетных и опытных данных видно, что, используя предложенный подход, можно практически на порядок повысить чувствительность выявления дефектов сцепления материалов по сравнению с традиционным методом даже при небольшом фазовом сдвиге рассеянных от дефекта волн $\theta \sim 0,15 \dots 0,2$ рад и даже менее. При этом, как видно, наибольшая чувствительность метода достигается в том случае, когда прием УЗК производится преимущественно под углом минимума первого порядка $\varphi_{\min 1}$. При приеме же УЗК под углом $\varphi_{\max 1}$ максимальная величина $|\Delta A|/A_{\max i}$ может существенно отличаться, что зависит от отношения площади пятна **АкЛ** и дефекта $\epsilon^* = S_D/S_0$. Причем с уменьшением величины ϵ^* это различие несколько сглаживается и весьма существенно зависит от выбора угла экваториальной плоскости ψ , в которой проводится прием сигнала.

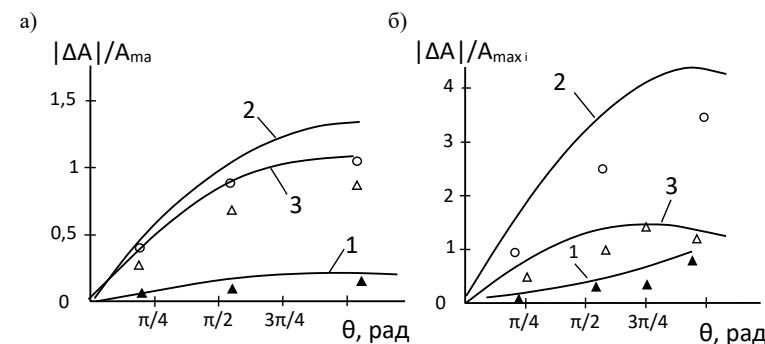


Рис. 2. Максимальное изменение акустического сигнала при смещении пятна акустического луча относительно дефектной области в виде круга (а) и полуплоскости (б) в зависимости от сдвига фазы θ , рассеянных от дефектной области волн; угол приема УЗК в меридианной плоскости: $\varphi = \varphi_{\max 0}$ (1), $\varphi_{\min 1}$ (2), $\varphi_{\max 1}$ (3), $\lambda = R/5$, $r = R/3$

Приведенные на рис. 3 данные исследований указывают на особенности изменения амплитудных характеристик поля рассеяния УЗК при приеме их в двух перпендикулярных плоскостях и наличии небольшого дефекта, область расположения которого пересекает движущийся **АкЛ**.

Как видно, при приеме УЗК в указанной плоскости смещение пятна **АкЛ** через зону дефекта сопровождается весьма значимой осцилляцией амплитудной характеристики $A^*(x_d/R) = |\Delta A|/A_{\max i}$, которая наиболее хорошо проявляется при приеме УЗК под углом $\varphi_{\max 1}$ в плоскости, совпадающей с осью перемещения **АкЛ**, и наоборот, что необходимо учитывать при проведении измерений. Как показывают расчеты, такой характер изменения $A^*(x_d/R)$ можно трактовать как проявление интерференции полей двух мнимых источников, создаваемых опорным сигналом

и движущимся источником с апертурой S_D . В процессе перемещения последнего диаграмма направленности (ДН) поля рассеяния в плоскостях, не совпадающих с плоскостью, перпендикулярной направлению движения **АкЛ**, будет изменяться вследствие одновременного изменения фазового сдвига, т. к. последний представляет в общем случае интег-

ральную функцию $\theta = \theta(x_d/R) = \theta \left(\sum_{i=1}^{i_0} \Delta l_i / \lambda \right)$, где l_i – характерное расстояние

между i -м источником площадью dS_D и точкой наблюдения. Если же прием УЗК проводится лишь под углом $\varphi \rightarrow \varphi_{\min 1}$, соответствующим формируемому полю ДН в отсутствие дефекта ($S_D \rightarrow 0$ и $A^* \rightarrow 0$), то при наличии последнего именно в этой области основной вклад в измеряемый сигнал даст поле отраженного **АкЛ** от дефекта. Как видно, проявление этого эффекта в динамике наиболее ярко, когда ось x направления движения **АкЛ** совпадает с плоскостью приема УЗК.

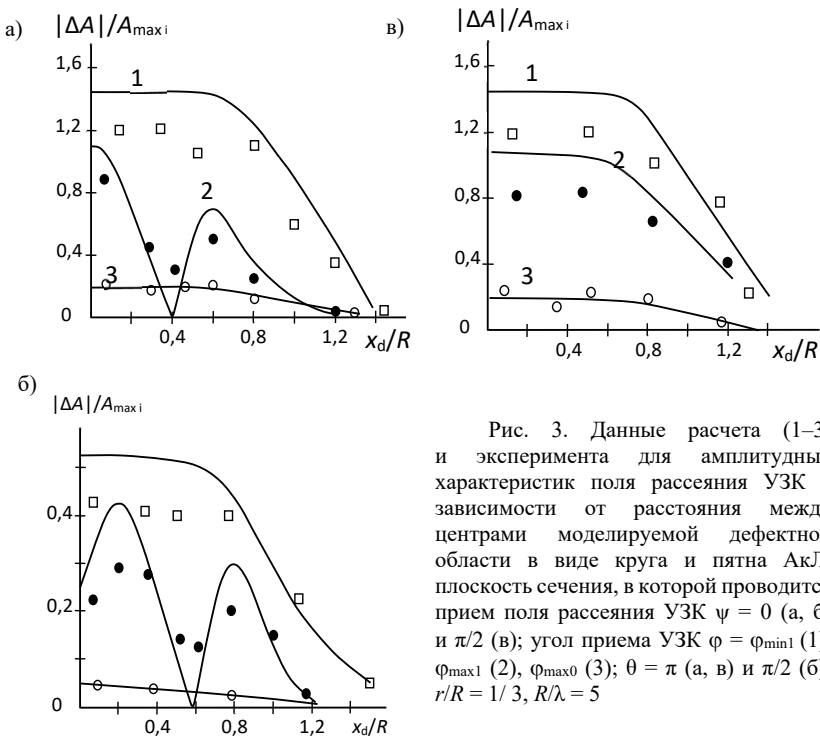


Рис. 3. Данные расчета (1–3) и эксперимента для амплитудных характеристик поля рассеяния УЗК в зависимости от расстояния между центрами моделируемой дефектной области в виде круга и пятна **АкЛ**: плоскость сечения, в которой проводится прием поля рассеяния УЗК $\psi = 0$ (а, б) и $\pi/2$ (в); угол приема УЗК $\varphi = \varphi_{\min 1}$ (1), $\varphi_{\max 1}$ (2), $\varphi_{\max 0}$ (3); $\theta = \pi$ (а, в) и $\pi/2$ (б); $r/R = 1/3$, $R/\lambda = 5$

6. **Шутов, А. М.** Проблемы закалки тонкого стекла и их решение / А. М. Шутов // Стекло и керамика. – 1992. – № 4 – С. 8–9.

7. **Ulrich, R.** Measurement of thin film parameters with a prism coupler / R. Ulrich, R. Torge // Appl. Opt. – 1973. – Vol. 12. – P. 2901–2908.

8. **Kersten, R. Th.** The prism-film coupler as a precision instrument. Part 1: Accuracy and capabilities of prism couplers as instruments / R. Th. Kersten // Optica Asta. – 1975. – Vol. 22, № 6. – P. 503–513.

9. **Унгер, Х.-Г.** Планарные и волоконные оптические волноводы / Х.-Г. Унгер. – Москва: Мир, 1980. – 656 с.

10. **Whito, J. N.** Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of Mode indices: a simple analysis / J. N. Whito, P. E. Heidrich // Appl. Opt. – 1976. – Vol. 15, № 1. – P. 151–155.

11. **Зленко, А. А.** Исследование параметров плоских оптических волноводов / А. А. Зленко, Н. М. Лындин // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6, № 5. – С. 1043–1047.

поверхности стекла, соответствующие определенным изменениям в технологическом процессе закалки, или δ_0 в различных точках изделия. При условии проведения измерений по одной методике точное значение величин C_1 и C_2 (или B) не имеет решающего значения. Величины C_1 и C_2 для объемного стекла можно найти путем проведения предварительных измерений.

Табл. 1. Результаты измерений для образцов разной толщины

	Поляризация	$\Delta N_0 \cdot 10^4$	$\Delta n_m = 1 \cdot 10^4$	$\Delta n_m = 2 \cdot 10^4$	$\Delta n_m = 3 \cdot 10^4$	$\Delta N_1 \cdot 10^4$	$\delta n_{\text{ср}} \cdot 10^4$
Образец № 1, толщина 0,5 см	TE	37,8	27,0	18,8	12,3	0	
	TM	39,7	29,0	20,9	14,4	2,0	
		1,9	2,0	2,1	2,1	2,0	2,02±0,08
Образец № 2, толщина 1,8 см	TE	48,5	32,7	20,7	12,9	0	
	TM	52,8	37,0	25,2	17,3	4,4	
		4,3	4,3	4,5	4,4	4,4	4,38±0,09
Образец № 3, толщина 1,2 см, незакаленный	TE	43,6	25,2	11,2	4,0	0	
	TM	43,4	25,1	11,2	4,1	0	
		-0,2	-0,1	0	+0,1	0	0,02±0,06

Таким образом, методы волноводной спектроскопии позволяют корректно оценивать величину остаточных механических напряжений в закаленном стекле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуславский, И. А. Высокопрочные закаленные стекла / И. А. Богуславский. – Москва: Изд-во лит. по стр-ву, 1969.
2. Гончаренко, А. М. Введение в интегральную оптику / А. М. Гончаренко, В. П. Редько. – Минск: Наука и техника, 1975. – 152 с.
3. Влияние напряжений на показатель преломления градиентных слоев стекла, полученных методом ионообменной диффузии / Л. Б. Глебов, Н. В. Никоноров, Г. Т. Петровский, М. И. Филиппова // Физика и химия стекла. – 1983. – Т. 9, № 6. – С. 683–688.
4. Kishii, T. Optical Waveguide Effect in Curved Chemically Strengthened Glasses / T. Kishii // Yogyo-KyoKai-Shi. – 1978. – Vol. 86, № 7. – P. 44–45.
5. Kishii, T. Surface Stress Measurement Using Optical Waveguide Effect of Chemically Tempered Glass / T. Kishii // Yogyo-KyoKai-Shi. – 1979. – Vol. 87, № 3. – P. 10–16.

Таким образом, авторами предложена и разработана установка для проведения экспериментального моделирования полей рассеяния продольных волн на границе материалов с дефектами сцепления разной формы, имитирующими фазовые сдвиги по отношению к опорному акустическому сигналу, вызванные особенностями взаимодействия контактирующих поверхностей неразъемных соединений.

Проведены расчеты и получены экспериментальные данные по исследованию влияния фазового сдвига между продольными волнами опорного сигнала и рассеянными модельной дефектной поверхностью. Результаты экспериментального моделирования подтверждают тот факт, что наибольшая эффективность выявления дефектов со слабой отражающей способностью звука достигается при приеме акустического сигнала в окрестности углов первого экстремума диаграммы направленности поля рассеяния. Результаты экспериментальных исследований находятся в неплохом качественном соответствии с расчетными данными эксперимента. Причем различие между ними преимущественно не превышает 20...25 %. Оно вызвано влиянием затухания УЗК в плексигласовой сферической подложке, сопровождающимся изменением спектра зондирующего сигнала, установкой на плоскую поверхность подложки тонкой пластинки с имитатором дефекта, конечного числа осцилляций в импульсе.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ, проект T19-136 от 02.05.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Review of Progress in Quantitative NDE / S. I. Rokhlin [et al.]. – Iowa State Center, Iowa State University, July 16–21, 2000.
2. Захаров, А. В. Исследование ультразвуковых спектральных методов контроля качества диффузионной сварки тонкостенных конструкций / А. В. Захаров, А. Х. Вовилкин // Дефектоскопия. – 1989. – № 7. – С. 17–21.
3. Моделирование отражения акустического пучка от границы раздела сред со смешанными граничными условиями / А. Р. Баев [и др.] // Весці фіз.-техн. Сер. 90. – 2004. – № 2. – С. 85–92.
4. Баев, А. Р. Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями. Ч. 1: Теоретический анализ / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 3–17.
5. Способ ультразвукового контроля качества склеивания материалов: пат. BY 15036 / А. Р. Баев. – Оpubл. 2012.
6. Рассеяние упругих волн неоднородной границей при акустическом контроле неразъемных соединений / А. Р. Баев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 360–372.

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

УДК 534.16

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

А. Р. БАЕВ¹, А. Л. МАЙОРОВ¹, Е. П. БАБУК², Г. Е. КОНОВАЛОВ¹¹Институт прикладной физики НАН Беларуси²ОАО «МАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ»
Минск, Беларусь

UDC 534.16

DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS OF ULTRASONIC CONTROL OF OBJECTS WITH INHOMOGENEOUS STRUCTURE

A. R. BAEV, A. L. MAYOROV, E. P. BABUK, G. E. KONOVALOV

Аннотация. Представлены результаты исследований и разработки новых методов и средств структуроскопии и дефектоскопии объектов машиностроительной промышленности, имеющих неоднородную структуру, включая изделия с неразъемными соединениями, с поверхностно упрочненными слоями стальных изделий, а также чугуны. Повышение эффективности неразрушающего контроля указанных объектов достигается за счет использования выявленных эффектов распространения и рассеяния подповерхностных и поверхностных волн на объектах со слоистой структурой, а также применения разработанных преобразователей.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, упрочненный слой, поверхностные волны, дефекты сцепления, чугуны.

Abstract. The results of research and development of new methods and means of structuroscopy and flaw detection of objects of the machine-building industry with a heterogeneous structure, including products with permanent joints, with surface-hardened layers of steel products, as well as cast iron are presented. Improving the efficiency of non-destructive testing of these objects is achieved through the use of the revealed effects of propagation and scattering of subsurface and surface waves on objects with a layered structure, as well as the use of developed transducers.

Key words: ultrasonic evaluation, cast iron, case hardened layer, be-metals, waves scattering, subsurface and surface waves, sound velocity, defects.

Представлены результаты исследований и разработок, выполненные в ИПФ НАН Беларуси в лаборатории ультразвуковых методов диагностики и позволившие создать эффективные методы и средства контроля указанного класса объектов, внедренные в производство на десятках предприятий как Беларуси, так и за рубежом.

Особенности структуроскопии чугунов. Использование акустического метода для диагностики физико-механических свойств литья чугунов (ЧГ) основано преимущественно на наличии взаимосвязи между скоростью C_{LT} продольной L или (что реже) поперечной T волны и модулем Юнга E металла, плотностью ρ и коэффициентом Пуассона ν : $C_{LT} = \sqrt{\frac{E}{\rho} f_{LT}(\nu)}$.

волноводного слоя величина механических напряжений δ_0 на поверхности закаленного стекла по закону фотоупругости будет равна $\delta_0 = \delta n / (C_2 - C_1)$, где C_1 и C_2 – фотоупругие постоянные материала. Величину $B = C_2 - C_1$ обычно называют оптическим коэффициентом напряжений. В зависимости от способа измерения в качестве величины δ_n могут фигурировать: разность ПП на поверхности флот-волновода при ТЕ- и ТМ-поляризациях света, рассчитанная из дисперсионного уравнения (1) двухмодовым методом ($\delta n = \delta N_0$); разность волноводных ПП любой из мод этого волновода, измеренная при тех же поляризациях света или усредненная по всем m ($\delta n = \delta n_m$) или анизотропия ПП той области стекла, которая служит подложкой для граничащего с ней волновода ($\delta n = \delta N_1$). Во всех трех вариантах по причине многократного превышения толщины области сжимающих напряжений по сравнению с толщиной флот-слоя полученные результаты должны совпадать между собой.

Ниже представлены результаты измерения оптической анизотропии и поверхностных напряжений в двух образцах термически закаленного стекла марки ВВ и одном незакаленном образце. Оценка величины механических напряжений осуществлялась поляризационно-оптическим методом на разработанной установке с учетом значений порядка интерференции поляризованного света во взаимно перпендикулярных направлениях. Волноводные измерения проводились на лабораторном стенде, схема которого приведена на рис. 1, по трем наиболее контрастным волноводным модам при ТЕ- и ТМ-поляризациях света. Одновременно измерялся ПП подложки волновода, соответствующий ПП области стекла, граничащий с флот-слоем. Точность измерения разности ПП волноводных мод по отношению к подложке составила $\pm 1 \cdot 10^{-5}$. Рабочая длина волны – 0,589 мкм, ПП иммерсионной жидкости –1,530. Значения ΔN_0 в табл. 1 рассчитаны из уравнения (1).

Для образцов № 1 и 2 поверхностные напряжения δ_0 , рассчитанные по формуле (1) при значении коэффициента $B = 2,61 \cdot 10^{-5}$ мм²/кг равны 7,74 и 16,8 кг/мм² соответственно. Поверхностные напряжения на незакаленном стекле с флот-слоем равны нулю в пределах погрешности метода.

Чтобы вычислить абсолютную величину напряжений в поверхностном слое закаленных изделий, в частности листового стекла, необходимо знать величину оптического коэффициента напряжений δ_0 . Для закаленного стекла и для стекла, легированного в процессе диффузии олова, таких данных в литературе обнаружить не удалось. Обычно предполагается, что их величина не изменяется в процессе термообработки и после флот-процесса и принимается равной значению B для исходного стекла. На практике важно уметь измерять относительные изменения δ_0 на

призмы и ее параметры рассчитаны таким образом, чтобы все m -линии попадали в поле зрения окуляра при работе со стандартными техническими стеклами с показателем преломления $N_D = 1,518$. Как видно из выражения (1), величина волноводного ПП n_m и угол θ , под которым видны m -линии, существенно зависят от длины волны света λ . Поэтому даже при использовании в приборе интерференционных светофильтров с шириной полосы пропускания 10 мм без принятия специальных мер m -линии оказывались уширенными и слабоконтрастными из-за недостаточно монохроматического освещения. Это нежелательное явление в принципе устранимо, если подобрать такое соотношение показателей преломления и дисперсии материалов призмы и волновода, чтобы производная $\frac{d\theta}{d\lambda}$,

где θ – угол выхода m -линий по отношению к боковой грани призмы, была равна нулю. По расчетам авторов максимальная компенсация дисперсии достигается при следующем соотношении между параметрами исследуемого стекла и призмы:

$$\frac{dN_3}{d\lambda} = \frac{dn_m}{d\lambda} \cdot \left[N_3 / \left(n_m - \left(1 - \frac{n_m^2}{N_3^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sin \theta_{0m} \right) \right]. \quad (2)$$

Дополнительно для устранения aberrаций при преломлении света на выходной грани призмы требуется, чтобы угол θ_0 был равен нулю. В наибольшей мере указанной совокупности требований удовлетворяет оптическое стекло ТК16. Одновременно оно обладает высокой механической и химической стойкостью. Условие (2) выполняется для призмы из этого стекла с углом при основании $70,5^\circ$ с точностью 15 %. При макетных испытаниях прибора с такой призмой при 30-кратном увеличении зрительной трубы наблюдалась четкая картина узких m -линий в желто-красной области спектра как с интерференционным, так и с абсорбционным светофильтром из стекла КС14. При замене интерференционных фильтров абсорбционными обеспечивается более высокая светосила прибора. Иммерсионная жидкость, вводимая при измерениях между призмой и исследуемым образцом стекла, должна, во-первых, обеспечивать оптический контакт между ними. Во-вторых, чтобы исключить необходимость громоздких расчетов двулучепреломления стекла из уравнения (1) и на практике ограничиться непосредственными измерениями расстояний между m -линиями при помощи окулярного микрометра, ПП иммерсионной жидкости рекомендуется выбирать на 0,005...0,01 большим показателя преломления стекла.

Исследования анизотропии стекла поляризационно-оптическим и волноводным методами. С учетом плосконапряженного состояния

Последняя может изменяться практически в 2 раза преимущественно в зависимости от содержания в нем включений графита и их формы. Используя данные [1], показано, что причиной этого являются эффекты рассеяния УЗК на ансамбле включений шаровидного и пластинчатого графита, сжимаемость которого в ~ 40 – 50 раз меньше металла основы. На основе проведенных исследований разработан прибор (рис. 1), нашедший широкое применение для отбраковки высокопрочного чугуна (ВЧ) от серого (СЧ) с «промежуточной фазой» по данным корреляции между скоростью УЗК и прочностными свойствами ЧГ.

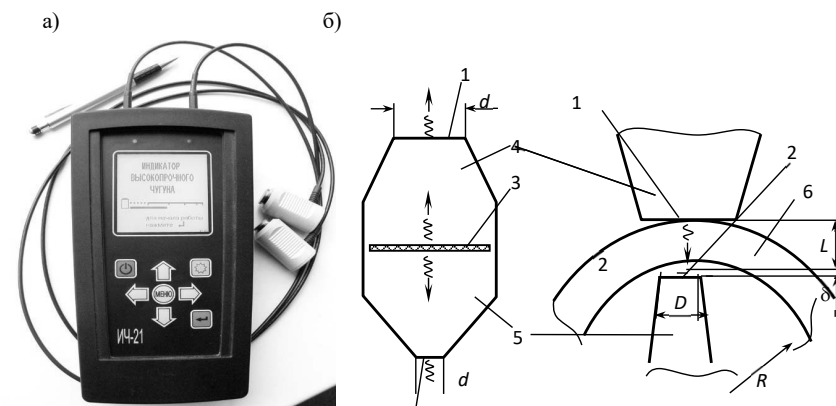


Рис. 1. Прибор ИЧ для структуроскопии чугунов и пояснение к одной из конструкций ПЭП и их работе: 1, 2 – поверхности излучения и приема УЗК; 3 – пьезопластина; 4, 5 – волноводы ПЭП; 6 – объект

В электронном блоке таких приборов заложена программа нивелирования влияния состояния акустического контакта на точность измерений, проводимых в теновом режиме и режиме эхо, зависящего от шероховатости и радиуса кривизны поверхности. Размеры акустической базы прозвучивания (0,7...30 см), соответственно с которыми выбраны апертуры ПЭП, позволяющие нивелировать «волноводный» шумовой фон.

Выполненные в последнее время совместно с ЦЗЛ Минского автомобильного завода исследования позволили разработать и внедрить методику отбраковки чугуна марки СЧ20 от СЧ15 и 25, в основу которой положена корреляционная зависимость C_L от твердости (рис. 2). Подобный предварительный результат был получен и при исследовании образцов марки КВЧ35. Для повышения эффективности контроля ЧГ были изучены возможности использования магнитного метода в качестве дополнительного. Он реализуется путем измерения остаточного поля H_{oc} после отрыва магнита от поверхности образца. Установлена высокая эффективность использования сочетания двух указанных методов контроля не только для определения

марки чугуна (ВЧ50), но и (что весьма важно) оценки их твердости B_r , зависящей от содержания перлитной фазы. С увеличением же последней в диапазоне $q_{II} = 20 \dots 80 \%$ среднее значение H_{OC} возрастает практически

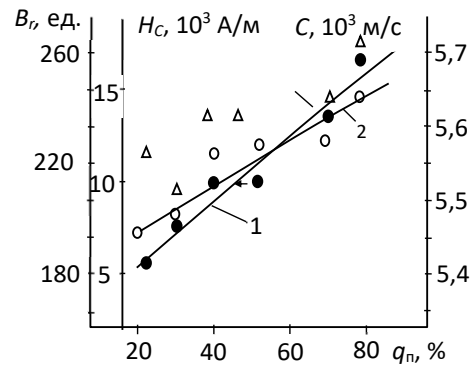


Рис. 2. Зависимости остаточного магнитного поля (1,о), твердости по Бринеллю (2,●) и скорости УЗК (Δ) в чугуне ВЧ50 от содержания перлита

в ~ 3 раза, а B_r – в 1,3–1,4 раза. Изменение же C_L близко к погрешности измерений. Для повышения эффективности контроля свойств ЧГ предложено использовать обнаруженный эффект рассеяния возбуждаемой ПАВ, реализованный с помощью раздельно совмещенного ПЭП. Установлено, что усредненная амплитуда A^* акустического шума, вызванного рассеянием поверхностной волны на включениях графита, существенно зависит от их формы и эффективного размера. Так, например, величина A^* , измеренная на образцах СЧ20

более чем на порядок превышает полученную на образцах ВЧ50. Эффективность такого метода определяется преимущественно рабочей частотой волны и углами излучения-приема УЗК.

Контроль глубины упрочненного поверхностного слоя (УПС).

Задача определения глубины h упрочнения изделий ТВЧ-закалкой, термохимической обработкой и др., а также восстановления твердости по глубине УПС решается на основе использования данных о скорости поверхностной волны C_R или частотной зависимости $C_R(f)$. При этом максимальное изменение величины $C_R(h)$ не превышает 2...3 %, что требует измерения времени прохождения сигнала на заданной базе L с точностью $\sim 2 \dots 3$ нс и реализуется с использованием разработанных авторами конструкций малоапертурных ПЭП, с рабочей поверхностью $S \sim 0,1 \text{ мм}^2$ [2]. Измерение же C_R проводится на основе анализа корреляционной функции между двумя подобными сигналами, поступающими на приемные ПЭП от источника УЗК. Созданное программное обеспечение предполагает применение «компенсационного метода» для отстройки от ошибок, связанных с изменением акустического контакта, а также использование при обработке спектральных характеристик принимаемого сигнала дисперсионной зависимости $C(f)$, что позволяет исключить влияние свойств безуглероженного слоя, а также ряда случайных факторов, обусловленных контактными явлениями, на измерения. Таким образом, можно определять глубину упрочненного ТВЧ-закалкой, цементированием, лазерным

ПП любых из мод одинакового номера на ТЕ- и ТМ-поляризациях света. То есть практически $\delta N_0 = \delta n_0 = \delta n_m$. Расчеты по дисперсионным уравнениям могут привлекаться только при необходимости оценки толщины флюат-слоя. При измерении n_m волноводов в зрительную трубу прибора кроме m -линий видна также довольно контрастная граница между темным и светлым полем зрения. Она соответствует ПП стекла, на котором располагается волновод (ПП подложки). По положению этой границы при двух ортогональных поляризациях света может измеряться анизотропия области стекла, расположенной непосредственно под флюат-слоем. Однако такие измерения менее точны, чем измерения n_m по очень узким и контрастным m -линиям флюат-слоя. При отсутствии на стекле ВС упомянутая выше граница настолько не контрастна, что измерения становятся очень ненадежны. Поэтому рекомендуется измерения напряжений закаленных изделий волноводным методом выполнять на флюат-стороне стекол.

В основу конструкции прибора положена известная схема призмного устройства связи. Введение в нее дополнительных элементов вызвано необходимостью создания компактного накладного прибора. Принципиальная оптическая схема прибора приведена на рис. 1.

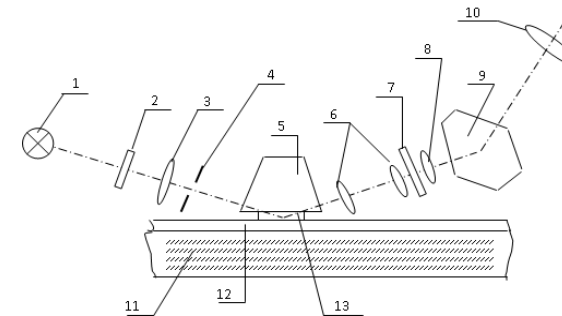


Рис. 1. Принципиальная схема прибора для измерения напряжений волноводным методом

Излучение от лампы накаливания 1 фокусируется конденсорной линзой 3 на нижней грани измерительной призмы 5. Состояние поляризации света задается поворотом поляриоида 2. Размеры и угол схождения сфокусированного светового пятна на призме задаются величиной фокусного расстояния линзы 3 и ограничиваются диафрагмой 4. При измерениях призма 5 приводится в оптический контакт с поверхностным слоем 12 исследуемого изделия 13. Отраженный от границы раздела «призма – стекло» свет проходит через коллиimator 6, узкополосный светофильтр 7 и попадает в телескопическую систему, состоящую из длиннофокусного объектива 8 и измерительного окуляра 10. При помощи последнего рассматривается картина m -линий волновода 12 и проводятся необходимые измерения m -спектра. Угол падения света на основание

закона распределения ПП $N(x)$ по глубине волноводного слоя [9]. Проведенные нами по методу ВКБ [10] предварительные расчеты профиля $N(x)$ флот-слоев на образцах промышленных закаленных стекол показали, что он близок к распределению, описываемому функцией ошибок. Это соответствует решению уравнения диффузии для диффузии из неограниченного источника. Вблизи поверхности стекла такое распределение может быть с успехом аппроксимировано более простой функцией $\Delta N(x) = \Delta N_0 \frac{x}{d}$, где $\Delta N_0 = N_0 - N_1$; N_0 и N_1 – ПП на поверхности волновода и исходного стекла соответственно; d – толщина флот-слоя.

Согласно [11] дисперсионное уравнение для такого волновода имеет вид:

$$\frac{4\pi d}{3\lambda} \cdot \frac{(N_0^2 - N_m^2)^{\frac{3}{2}}}{N_0^2 - N_1^2} = \arctg \left[\left(\frac{N_0}{N_2} \right)^x \cdot \sqrt{\frac{n_m^2 - N_2^2}{N_0^2 - n_m^2}} \right] + \pi \left(m - \frac{3}{4} \right), \quad (1)$$

где m – номер волноводной моды.

При распространении в волноводе мод ТЕ-поляризации $x = 0$, для ТМ-мод $x = 2$. Анализ уравнения (1) показывает, что величина волноводного ПП n_m зависит от номера волноводной моды, состояния поляризации распространяющегося в волноводе света, его длины волны λ и показателей преломления N_1 и N_2 , окружающих волновод сред. В принципе, изменяя хотя бы один из перечисленных параметров и каждый раз измеряя величину n_m , можно рассчитать величины ΔN_0 и d решением соответствующей системы дисперсионных уравнений. Так как волноводный флот-слой обычно поддерживает несколько волноводных мод, его параметры наиболее просто и с наибольшей точностью можно рассчитать по результатам измерения n_m всех имеющихся мод.

Как видно из уравнения (1), особым свойством планарных волноводов является наличие в них волноводной анизотропии ($n_m^{TE} > n_m^{TM}$), имеющее место даже при полной изотропности материала волноводного слоя (ВС). В случае анизотропии материала ВС это соотношение может измениться. На основании подкрепленных результатами экспериментальных исследований оценок авторы установили, что нежелательный вклад этой анизотропии в общую реально измеряемую анизотропию волновода можно практически устранить, если величину n_m измерять, вводя в зазор между призмой и волноводом иммерсионную жидкость с ПП, приблизительно равным ПП подложки. Особенно результативен этот прием для волноводов с небольшим скачком ПП и относительно большой толщиной, что и характерно для флот-волноводов. Таким образом, определение индуцированного напряжениями двулучепреломления на поверхности стекла может быть сведено непосредственно к измерению разности волноводных

отжигом поверхностного слоя среднеуглеродистых сталей с погрешностью не более 10...15 % и менее в диапазоне измеряемых толщин слоя от 0,3 до 5...6 мм. Электронный блок универсален, а конструкция преобразователей (излучателя и приемников УЗК) и рабочая частота определяются геометрией поверхности изделия, возможным диапазоном изменения глубины УПС. Разработанные устройства для контроля УПС металлоизделий различной конфигурации поставлены на ряд предприятий (Беларусь, Россия, Южная Корея) и перспективны для определения микрповрежденности металла, наклепа, накатки, ржавчины и др.

Совершенствование контроля качества сцепления материалов.

В основу создаваемых в ИПФ НАН Беларуси акустических методов и средств контроля сцепления различных материалов, получаемых при сварке, склейке, пайке, при газопламенном нанесении порошковых материалов, положены выявленные закономерности формирования акустических полей: подповерхностных продольных и поперечных волн, возбуждаемых при падении УЗК на объект под первым β_1 или вторым β_2 критическими углами, при наличии и отсутствии акустической нагрузки ($\beta_i = \arcsin(C_2/C_1)$, где $C_1 = C_L$, а $C_2 = C_T$), рассеянных при пересечении акустическим пучком неоднородной границы соединяемых материалов.

Метод и устройство контроля поршней двигателей внутреннего сгорания грузовых автомобилей на качество сцепления нирезистовой вставки (в виде диска) с телом поршня. В основу разработки положен принцип зондирования границы сцепления нирезистовой вставки с телом поршня подповерхностной вертикально поляризованной поперечной волной [3, 4]. Проведенные исследования (рис. 3) показали принципиальную возможность использования таких волн для обнаружения подповерхностных (плоских) дефектов с малой отражающей способностью, и существенно большую чувствительность, чем при применении головных волн. Это достигается, прежде всего, за счет ориентации вектора смещений $\vec{\xi}$ сдвиговой волны в направлении, близком к боковой плоскости сцепления вставки поршня с его телом, а также за счет меньшей (~2 раза) длины.

Программно-вычислительный комплекс установки позволяет определять количество дефектов, их общую площадь на каждой границе контакта вставки с основой поршня, а также взаимную площадь их перекрытия. При этом исключается выход на технологическую линию чистовой обработки дефектных изделий. Разработанный метод и установки контроля поршней двигателей внутреннего сгорания впервые внедрены на крупных моторостроительных и др. предприятиях Беларуси и России (Минск, Ярославль, Тутаев, Кострома, Набережные Челны). Последняя версия разработки не имеет аналогов в мире и может быть использована для интенсивного контроля поршней 14 видов.

Эффекты трансформации и рассеяния УЗК при контроле биметаллических соединений и сварки. При проведении исследований

распространения подповерхностных волн в материалах с низким акустическим импедансом R_2 и «скользящей акустической нагрузкой» (АН) с импедансом $R_1 \gg R_2$ и скоростью объемных волн $C_1 > C_2$, впервые обнаружен эффект распространения слабо затухающей поверхностной волны, подобной волне Стоунли (ВС), имеющей скорость $C_{St} \approx C_2$ и глубину локализации в поверхностном слое АН $\delta < 0,5\lambda$ [5].

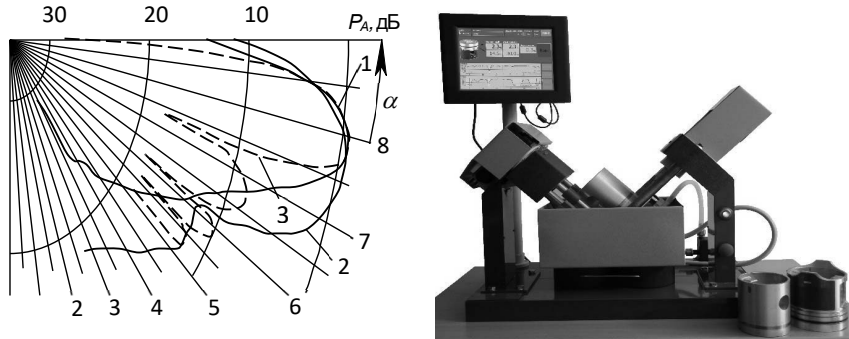


Рис. 3. Поле излучения источника подповерхностной поперечной (1) и продольной (2) волны в стали и установка для контроля поршней двигателей автомобилей ($f = 1,8$ МГц), расчетная диаграмма направленности для поперечной подповерхностной волны (3); размер излучателя $2a = 18$ мм, $f = 1,8$ МГц

Более глубокое изучение особенностей возбуждения и рассеяния таких волн в области контакта АН с основой позволили: существенно повысить дальность действия подповерхностных волн, увеличив угол ввода УЗК в объекты с низкой скоростью УЗК; установить основную причину возникновения акустического шума, ограничивающего использование современных раздельно-совмещенных ПЭП и предложить принципы снижения шума, позволившие увеличить чувствительность измерений. Разработанные конструкции ПЭП выполнены с локальной иммерсионной ванной и управляемой разделительной перегородкой для создания опорного сигнала, что существенно расширило возможности контроля сцепления тонких защитных покрытий объектов с разной кривизной поверхности. Такие конструкции ПЭП впервые внедрены на ряде предприятий автомобильной и нефтеперерабатывающей промышленности. В частности, для контроля оловянно-свинцовых покрытий подшипников скольжения толщиной до $h \geq 0,2 \dots 0,3$ мм и радиусом $R \geq 2,5$ см без притирки рабочей поверхности ПЭП к поверхности подшипников не только со стальной, но латунной и чугунной основой. Причем наличие пор в основе (чугуне и латуни) вблизи границы, создающих ложные отражения, не оказывают существенного влияния на достоверность и производительность контроля. Такие устройства применены для контроля напыленных покрытий рессор

Используемые термически полированные стекла изготавливаются с применением флоат-технологии, в результате чего поверхностный слой стекла, контактирующий с расплавом олова обогащается ионами олова, что приводит к изменению его свойств, в частности, к росту показателя преломления (ПП). Известно, что слой прозрачного диэлектрика с повышенным ПП, окруженный средами с более низкими ПП, представляет собой планарный оптический волновод [2], для исследования которого применимы методы волноводной спектроскопии. Волноводный метод определения напряжений в закаленных стеклах в значительной мере свободен от указанных выше недостатков. Суть излагаемого ниже способа измерения параметров модифицированного упрочненного слоя стекла заключается в определении методами волноводной спектроскопии двулучепреломления, наведенного сжимающими напряжениями в поверхностном слое [3–5].

Волноводная методика определения двулучепреломления и напряжений сжатия на поверхности плоских закаленных стекол. Известно, что приповерхностная область плоских термически закаленных стекол находится в сжатом состоянии, а центральная область – в растянутом [1]. Если размеры образца значительно больше его толщины, то реализуется плосконапряженное состояние. Следовательно, по закону фотоупругости первоначально изотропная стеклянная пластина после закалки станет оптически анизотропной, при этом поверхностный слой в первом приближении можно рассматривать как положительный кристалл с оптической осью, направленной перпендикулярно поверхности образца. Для прямого измерения поверхностных напряжений волноводным методом необходимо, чтобы свет распространялся по приповерхностному слою стекла. Следовательно, требуется, чтобы этот слой обладал свойствами волновода. В отличие от ионно-обменного упрочнения после термической закалки показатель преломления поверхности стекла заметно не повышается. Однако, если перед закалкой стекло прошло термическую полировку, одна из его поверхностей, контактировавшая с расплавом олова, приобретает волноводные свойства вследствие диффузии олова. Поверхностные сжимающие напряжения закаленного стекла индуцируют в волноводном флоат-слое оптическую анизотропию. Волны ТЕ-поляризации будут соответствовать обыкновенным лучам, а волны ТМ-поляризации – необыкновенным. Величина наведенной анизотропии будет равна разности показателей преломления $\delta N_0 = N_0^{TM} - N_0^{TE}$ материала световедущего слоя, здесь N_0 – ПП материала однородного волноводного слоя и ПП на поверхности градиентного слоя. Существующие методы позволяют по измеренному спектру мод с высокой точностью определить показатель преломления N_0 и толщину d плоского однородного волноводного слоя или параметры градиентных слоев [6, 7]. Эти параметры рассчитываются из дисперсионных уравнений. Вид дисперсионного уравнения зависит от

УДК 535.5 + 621.658.011:620.1

АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЗАКАЛЕННОГО СТЕКЛА**А. В. ХОМЧЕНКО¹, И. У. ПРИМАК¹, А. И. ВОЙТЕНКОВ²,
В. М. КУЛЬБЕНКОВ²**¹Белорусско-Российский университет²УЧПП «КУВО»

Могилев, Беларусь

UDC 535.5 + 621.658.011:620.1

ANALYSIS OF RESIDUAL MECHANICAL STRESSES IN THE SURFACE LAYER OF TEMPERED GLASS**A. V. KHOMCHENKO, I. U. PRIMAK, A. I. VOYTENKOV, V. M. KUL' BENKOV**

Аннотация. Продemonстрирована возможность измерения двулучепреломления в неоднородных анизотропных средах методом волноводной спектроскопии. Исследованы возможности и границы применения метода при анализе распределения величины механических напряжений в закаленном стекле.

Ключевые слова: волноводная спектроскопия, метод измерения, остаточные напряжения, двулучепреломление, закаленное стекло.

Abstract. The possibility of measuring the birefringence in inhomogeneous anisotropic materials by the waveguide spectroscopy technique is demonstrated. The possibilities and application limits of the technique for measuring of the mechanical stresses in the tempered glass are investigated.

Key words: waveguide spectroscopy, measurement technique, residual mechanical stresses birefringence, tempered glass.

В технике широко используются изделия из стекла, для улучшения механических свойств которых их поверхность обычно подвергается упрочнению. В ряде случаев упрочнение выполняется методом термической закалки [1]. Величина сжимающих напряжений, возникающих в поверхностном модифицированном слое упрочняемых изделий, определяет качество изделий и зависит от параметров технологического процесса. Поэтому определение величины напряжений является удобным способом контроля как качества изделий, так и технологических процессов изготовления закаленных стекол. Широкое распространение на производстве и в лабораторной практике получил поляризационно-оптический метод, однако ему присуща значительная погрешность, что обусловлено тем, что небольшие изменения растягивающих напряжений в центре закаленной стеклянной пластины вызывают значительные изменения сжимающих напряжений, концентрирующихся в сравнительно тонком поверхностном слое [1]. Поэтому для получения надежных результатов сжимающие напряжения должны измеряться непосредственно на поверхности стекла.

автомобилей, сварки заднего моста грузовых автомобилей, заменив рентгеновский контроль и др. При этом имеются возможности механизировать и автоматизировать трудоемкие процессы контроля.

Метод оптимизации апертур и фаз мнимых источников УЗК, рассеянных неоднородной границей. Этот метод, предложенный в [4], предназначен как для выявления дефектов сцепления (адгезии) материалов со слабой отражающей способностью, включая дефекты слипания, так и для определения эффективной площади дефекта. Он реализуется именно в процессе перемещения падающего на границу сред акустического пучка через дефектную область, когда происходит интерференция акустических лучей, рассеянных дефектной S_D и бездефектной S_{DN} частью поверхности. Особенность метода состоит в выборе углов падения УЗК на границу сред α и их приема φ , при которых фазовый сдвиг φ между рассеянными от поверхностей S_D и S_{DN} волнами максимален; прием сигнала же производится в окрестности минимумов или максимумов 1-го или 2-го порядка диаграммы направленности. Развитие указанного подхода позволило впервые предложить прямой метод и средства ультразвукового контроля качества сварки газовых (полиэтиленовых) трубопроводов низкого и среднего давления для выявления наиболее опасных дефектов слипания материалов.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ, проект T19-136 от 02.05.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аббакумов, К. Е.** Методы и аппаратура ультразвукового контроля изделий из материалов порошковой металлургии. Контроль микро- и макроструктуры / К. Е. Аббакумов, Т. М. Гурьева // Дефектоскопия. – 1993. – № 8. – С. 39–45.
2. Повышение точности измерения временных интервалов при использовании ультразвуковых преобразователей с локализованным акустическим контактом / А. Р. Баев [и др.] // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. науч. тр. – Минск, 2011. – С. 118–123.
3. Способ ультразвукового контроля качества склеивания материалов: пат. BY 15036 / А. Р. Баев. – Оpubл. 2012.
4. **Baev, A. R.** New aspects of excitation and propagation of subsurface longitudinal and transverse waves / A. R. Baev, M. V. Asadchaya, G. E. Konovalov // Materials of 10-th European Conf. on NDT. – Moscow, 2010. – P. 240–247.
5. Влияние акустической нагрузки на распространение подповерхностных продольных волн / А. Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 14–24.

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

УДК 620.164.1, 620.174.21, 620.174.25

ВРЕМЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА МОНОЛИТНОГО ПРОЗРАЧНОГО ПОЛИКАРБОНАТА НА ИЗГИБНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ

Е. А. БОБИНА, М. П. ДАНИЛАЕВ, М. А. КЛАБУКОВ, В. А. КУКЛИН

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева
Казань, Россия

UDC 620.164.1, 620.174.21, 620.174.25

PIEZOELECTRIC RESPONSE TIME SETTING OF MONOLITHIC TRANSPARENT POLYCARBONATE TO BENDING DEFORMATION **E. A. BOBINA, M. P. DANILAEV, M. A. KLABUKOV, V. A. KUKLIN**

Аннотация. Расширение областей применения прозрачных монокристаллических стекол (поликарбонат, полиметилметакрилат) требует контроля изменения предела прочности этих материалов и изделий из них в процессе эксплуатации. Перспективный метод бесконтактного контроля изменения предела прочности прозрачных монокристаллических материалов основан на пьезоэффекте. В работе определялось временное ограничение установления пьезоотклика на приложенную нагрузку, что является важным при циклических нагрузках, происходящих с разными скоростями.

Ключевые слова: пьезоэффект в полимерах, предел прочности поликарбоната.

Abstract. Expanding the scope of application of transparent monolithic organic glasses (polycarbonate, polymethylmethacrylate) requires monitoring during operation of changes in the tensile strength of these materials and their products. A promising method of contactless control of changes in the tensile strength of transparent monolithic materials is based on the piezoelectric effect. In this work we determined the time limitation of establishing the piezoelectric response to the applied load which is important for cyclic loads occurring at different speeds.

Key words: piezoelectric effect in polymers, polycarbonate tensile strength diagnostics.

Для неинвазивного контроля изменения предела прочности прозрачных монокристаллических стекол в процессе эксплуатации применяют различные методы, рассмотренные, например, в [1–4]. Один из перспективных методов неинвазивного контроля изменения предела прочности монокристаллических стекол основан на использовании пьезоэлектрического эффекта в полимерах [5].

Механизмом пьезоэффекта в полимерах является поляризация молекул полимера вследствие изменений в структуре материала под действием механических напряжений деформаций [6]. Поэтому использование пьезоэлектрического эффекта позволяет осуществлять контроль изменений в структуре материала, накопление которых приводит к изменению (как правило, уменьшению) предела прочности. Таким образом, по результатам измерений пьезонапряжения возможно прогнозировать изменение предела

Результаты разработки обеспечили цифровому электрометрическому зонду возможность получения полных характеристик сигнала в реальном масштабе времени, что может быть использовано для дополнительного подавления шумов и паразитных гармоник сигнала, а также для статистического вычисления амплитуды сигнала. Тем самым обеспечивается существенное повышение точности определения параметров компенсационной зависимости и, соответственно, точности измерения контактной разности потенциалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pantsialeyeu, K. U.** Dig-ital contact potential difference probe [Electronic resource] / K. U. Pantsialeyeu, A. I. Svistun, A. K. Tyavlovsky, A. L. Zharin // Dig-ital Devices and Methods of Measure-ments. – 2016; 7(2):136-144. (In Russ.) – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144>.
2. **Pantsialeyeu, K. U.** Design of the con-tact potentials difference probes [Electronic resource] / K. U. Pantsialeyeu, U. A. Mikitsevich, A. L. Zharin // Devices and Methods of Measurements. – 2016; 7(1):7-15. (In Russ.). – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15>.
3. **Брейсуэлл, Р. Н.** Быстрое преобразование Хартли / Р. Н. Брейсуэлл // ТИИЭР. – 1984. – С. 19–27.
4. **Залманзон, Л. А.** Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – Москва: Наука, 1989. – С. 191–194.
5. **Arduino FHT Library** [Electronic resource]. – Mode of access: <http://wiki.openmusiclabs.com/wiki/ArduinoFHT>. – Date of access: 01.08.2020.

E-mail: nil_pt@bntu.by.

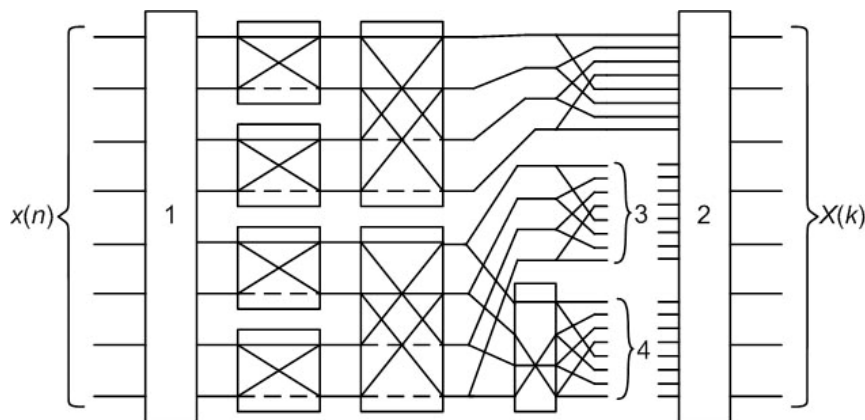


Рис. 1. Схема выполнения быстрого преобразования Хартли для восьмиточечной последовательности: 1 – операция перестановки; 2 – операция объединения; 3 – линии передачи сигналов C_m при $0 \leq m \leq 7$; 4 – линии передачи сигналов S_m при указанных выше значениях m (обозначения C_m и S_m приняты соответственно для $\cos(2\pi m/L^2)$ и $\sin(2\pi m/L^2)$, где L – номер шага преобразования)

В рамках проведенного исследования была создана программная реализация быстрого преобразования Хартли для сигнала цифрового электрометрического зонда Кельвина на базе микроконтроллера Atmel Mega 2560. Обработываемые данные (отсчеты измерительного сигнала) имеют 16-битный формат, являясь числом с фиксированной точкой. Это обеспечивает на низких частотах порог шума около -78 дБ.

В каждом вычислении выражения (6) необходимо умножать множество исходных значений на синусные и косинусные константы. В случае Atmel Mega 2560 для этого требуются большие вычислительные ресурсы, поскольку умножение 16 бит на 16 бит требует 18 тактовых циклов. С другой стороны, сложение 16 бит и 16 бит требует только два тактовых цикла. Поскольку синусные и косинусные константы, используемые в быстром преобразовании Хартли – это просто 0 и 1, то операция умножения оказывается необязательной и может быть заменена сложением. К примеру, для получения 256 выходных отсчетов требуется выполнить 1024 сложных умножения, из которых 382 – это умножения на 0 или 1. Для автоматического поиска условий, использующих множители 0 и 1, в разработанном программном обеспечении использованы средства библиотеки Arduino FHT [5]. При использовании данной библиотеки общее количество операций умножения для получения N выходных отсчетов преобразования Хартли составляет $(N/2) \cdot \log_2(N)$, что обеспечивает существенное повышение быстродействия и позволяет выполнять измерения в реальном масштабе времени.

прочности полимерного материала, проявляющего пьезоэлектрические свойства.

Однако применение такого метода требует выявления ограничений его использования. Основные ограничения могут быть связаны: с ограниченным динамическим диапазоном пьезонапряжения, в котором наблюдается воспроизводимое соответствие этого напряжения и силы отклика образца на приложенную внешнюю нагрузку; ограничением снизу на время τ_0 установления пьезоотклика на приложенную внешнюю нагрузку; отношением сигнал/шум при измерении пьезоотклика и рядом других. Временное ограничение τ_0 является особенно важным при циклических нагрузках на материал, происходящих с разными скоростями. Следует отметить, что величина τ_0 может изменяться при различной интенсивности внешних нагрузок. Это обусловлено структурой (как молекулярной, так и надмолекулярной) полимерного материала и ее откликом на внешнее механическое воздействие [7].

Целью настоящей работы является определение изменения величины τ_0 при различных деформациях на образец монолитного прозрачного поликарбоната.

Метод и ограничения метода. Определение изменения значений τ_0 осуществлялось экспериментально на образцах монолитного прозрачного поликарбоната марки Novattro $100 \times 100 \times 3$ мм. Образцы монолитного прозрачного поликарбоната деформировали на трехточечный изгиб на машине для механических испытаний Shimadzu с одновременным измерением пьезонапряжения и динамики его изменения по схеме, приведенной в [5]. Нагружение образцов осуществлялось до заданной деформации со скоростью 5 мм/мин, с последующим выдерживанием образцов под постоянной нагрузкой [8]. Пьезонапряжение U измерялось вольтметром В7-78/1 (входное сопротивление ~ 10 ГОм) с погрешностью измерений не более 10 %. Электроды для определения пьезонапряжения представляли собой напыляемое электропроводящее медное покрытие с подклеенными к нему проводами. Электроды наносили на противоположные стороны образцов. Схема нанесения электродов и их размеры представлены в [5].

Результаты измерений силы P отклика образца на механическое воздействие при деформации на изгиб определялись с использованием программного обеспечения TRAPEZIUM X, погрешности измерений не превышали ± 5 %. Были выбраны значения деформации, соответствующие трем областям.

1. Упругие деформации – $P \sim (275,7 \pm 13,7)$ Н.
2. Упругие деформации, предшествующие трещинообразованию, – $P \sim (614,7 \pm 30,7)$ Н.
3. Начало трещинообразования – $P \sim (776,7 \pm 38,8)$ Н.

Эти значения были установлены экспериментально по результатам предварительных испытаний. После достижения соответствующей деформации нагружение останавливалось и образец находился под нагрузкой до установления постоянной величины пьезонапряжения $U = \text{const}$.

Результаты экспериментов. Результаты измерений приведены на рис. 1 (измерения с образцов, нагруженных в областях деформации 1, 2 и 3 соответственно).

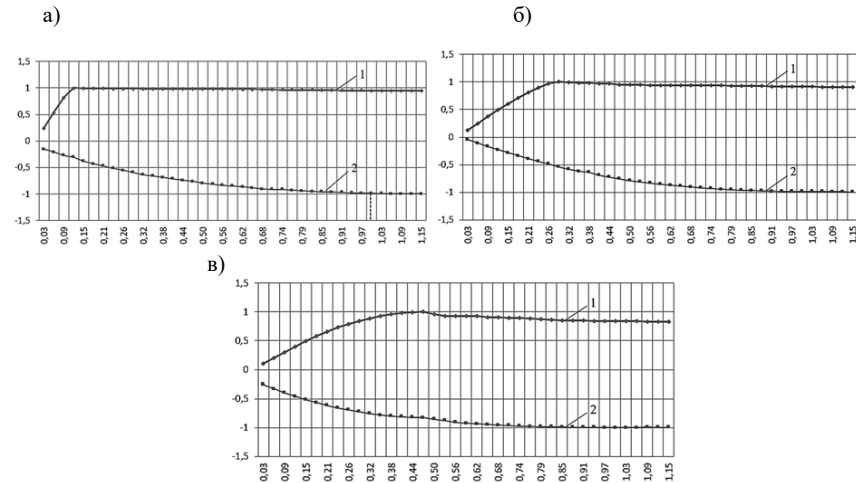


Рис. 1. Типовые временные зависимости нормированных силы нагружения P (1) и пьезонапряжения U (2)

Нормировка пьезонапряжения U проводилась на усредненное (среднее арифметическое по нескольким измерениям одного из образцов) максимальное значение, которое в эксперименте составило: для образцов 1 области деформации (см. рис. 1, а) – $U_{1\max} = (4,3 \pm 0,4)$ В; для образцов 2 области деформации (см. рис. 1, б) – $U_{2\max} = (4,07 \pm 0,4)$ В; для образцов 3 области деформации (см. рис. 1, в) – $U_{3\max} = (3,98 \pm 0,3)$ В. Вдоль оси абсцисс отложено нормированное время измерений. Нормировка проводилась по времени выхода на квазистационарный уровень пьезонапряжения, абсолютное значение которого составило $\tau_{\text{норм}} = 340$ с, на рис. 1, а оно показано пунктирной линией.

Эксперименты показали, что времена установления пьезонапряжения τ_{0j} – для трех ($j = 1, 2, 3$) вариантов нагружения (см. рис. 1, а–в соответственно) – уменьшаются с ростом деформации, а времена τ_{mj} установления силы P отклика образцов на деформацию возрастают. График

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Sh(\omega) \cos 2\pi f t d f.$$

Прямое и обратное преобразование Хартли взаимно симметричны. Преобразования Фурье и Хартли связаны соотношениями

$$S(f) = Sh_{\text{sym}}(f) - j Sh_{\text{asym}}(f), \quad (4)$$

$$Sh(f) = A(f) - B(f), \quad (5)$$

где $A(f)$ – четная вещественная часть спектра Фурье; $B(f)$ – нечетная мнимая часть спектра Фурье.

Таким образом, преобразование Фурье равно разности четной составляющей преобразования Хартли и нечетной составляющей, умноженной на j , а преобразование Хартли определяется как разность вещественной и мнимой составляющих преобразования Фурье.

Алгоритм быстрого преобразования Хартли аналогичен алгоритму БПФ, хотя в этом случае обработка данных производится в другом порядке [4]. Общая формула разложения Хартли для алгоритма быстрого преобразования имеет следующий вид:

$$X(k) = X_{a1}(k) + X_{a2}(k) \cos 2\pi k / n + X_{a2}(N - k) \sin 2\pi k / N, \quad (6)$$

где $X_{a1}(k)$ и $X_{a2}(k)$ соответственно равны $\frac{1}{2} \{\alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \dots \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \dots\}$ и $\frac{1}{2} \{\alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \dots \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \dots\}$.

Преобразование Хартли оказывается более экономным по времени, так как все операции с вещественными числами как при прямом, так и при обратном преобразованиях, выполняемых единообразно, производятся несколько быстрее, чем при преобразовании Фурье. Экономия времени обработки информации получается и благодаря особому построению представленного на рис. 1 алгоритма быстрого преобразования. При выполнении первых двух этапов, следующих за операцией перестановки, косинусные и синусные множители в формуле (6) принимают только значения или 1, или -1. Передача сигналов, показанная для этих этапов на рис. 1 сплошными линиями, производится без их изменения, а передача сигналов, показанная прерывистыми линиями, с их инвертированием. На следующем этапе приведенного на рис. 1 преобразования двум третям ветвей отвечают косинусные и синусные множители, часть которых также равна 0 или 1, или -1.

измерительного преобразователя был реализован оригинальный метод измерений с неполной компенсацией сигнала [1], обеспечивающий кратное сокращение времени единичного измерения, но требующий использования вычислительных микроконтроллерных средств для определения результата измерения.

Измерительный сигнал малогабаритного вибрирующего зонда Кельвина имеет сложную форму и спектральный состав, что обусловлено нелинейностью системы «вибрирующий зонд – образец» [2]. В связи с этим для выделения информативных параметров сигнала и вычисления значений измеряемой величины КРП необходимо выполнить вычисление основных гармонических составляющих измерительного сигнала, причем такие вычисления должны выполняться в реальном масштабе времени. Это накладывает жесткие ограничения на быстродействие применяемых вычислительных средств и алгоритмов.

Из числа цифровых методов определения спектрального состава сигнала наибольшее распространение получил метод на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). БПФ отображает вещественные функции в комплексную область и при этом является несимметричным по комплексной переменной, что усложняет его программную реализацию и замедляет выполнение расчетов с использованием микроконтроллера. Преобразование Хартли является аналогом преобразования Фурье и может применяться для спектрального анализа, фильтрации и обработки сигналов [3]. В отличие от преобразования Фурье преобразование Хартли осуществляет преобразования только в вещественной области, отображая вещественные сигналы $s(t)$ в вещественные $S(\omega)$. Преобразование Хартли задается выражениями

$$Sh(\omega) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cos \omega t dt, \quad (1)$$

$$s(t) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} Sh(\omega) \cos \omega t dt, \quad (2)$$

где $\cos$ – сумма косинуса и синуса одного аргумента,

$$\cos \omega t = \cos \omega t + \sin \omega t. \quad (3)$$

Множители $1/\sqrt{2\pi}$ обусловлены применением в формулах аргумента ω . Они могут заменяться одним множителем $1/2\pi$ только в (2), но это нарушает симметричность прямого и обратного преобразования. При необходимости применения симметричных алгоритмов в формулах можно использовать аргумент циклической частоты:

$$Sh(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cos 2\pi f t dt,$$

зависимости отношения соответствующих времен установления $\alpha(P) = \tau_{0j}/\tau_{mj}$ от силы P отклика образца представлен на рис. 2.

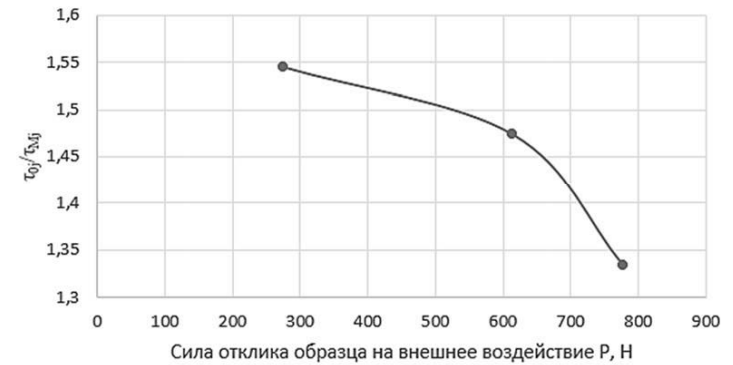


Рис. 2. График зависимости отношения времен релаксации τ_0/τ_{mj} от силы отклика образца на механическое воздействие P

Таким образом, при большей деформации установление пьезонапряжения происходит быстрее, а время установления пьезонапряжения становится сопоставимо с временем установления силы отклика образца на механическое воздействие. Это объясняется тем, что при большем значении силы нагружения P ориентация молекул происходит быстрее, а значит быстрее происходит и поляризация и, как следствие, пьезоотклик [9].

Выводы. Проведенные исследования показали, что задержка $\alpha(P)$ пьезоэлектрического отклика относительно механического отклика с ростом деформации уменьшается. Это обуславливает увеличение числа высокочастотных составляющих в спектре сигнала пьезонапряжения. Следует отметить, что при малых деформациях изменения в структуре материала маловероятны. Поэтому рост числа высокочастотных составляющих только выше частоты $f_0 = 1/\tau_{02}$, что свидетельствует о начале структурных изменений в материале. Это может быть использовано для контроля изменения предела прочности монолитного прозрачного поликарбоната. Однако абсолютные значения f_0 находятся в области низкочастотных шумов радиоаппаратуры. Это следует учитывать при выборе метода измерения пьезонапряжения и проектировании соответствующих принципиальных схем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов, А. Ю.** Исследование процессов растворимости и диффузии полимера методом лазерной интерферометрии / А. Ю. Абрамов, В. П. Рябухо, А. Б. Шиповская // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, вып. 12. – С. 45–50.
2. **Хомченко, А. В.** Поляризационная интерферометрия закаленного стекла / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апр. 2016 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 286–287.
3. Диагностика технических устройств / Г. А. Бигус [и др.]. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 615 с.: ил.
4. **Жданов, Г. С.** Основы рентгеноструктурного анализа / Г. С. Жданов. – Москва; Ленинград, 1940.
5. **Бобина, Е. А.** Определение механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе эксплуатации / Е. А. Бобина, Л. А. Гимадеева, М. П. Данилаев // ИВД. – 2018. – № 2 (49).
6. **Nalwa, H.** Ferroelectric Polymers / H. Nalwa // Marcel Dekker. – Inc. – New York, 1995. – 895 p.
7. Энциклопедия полимеров: в 3 т. / В. А. Каргин [и др.]. – Москва: Сов. энциклопедия, 1972.
8. **ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010).** Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб (с поправками).
9. Применение методики сканирующей силовой микроскопии пьезо-электрического отклика для исследования плёнок полидифениленфталата / Д. Д. Карамов [и др.] // Вестн. ЧелГУ. – 2015. – № 22 (377). – С. 9–14.

УДК 004.67:621.3.088

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА НА ОСНОВЕ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛИ

А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. Л. ЖАРИН, А. Д. ПОВЕДАЙКО, К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 004.67:621.3.088

DIGITAL SIGNAL PROCESSING FOR SCANNING KELVIN PROBE USING FAST HARTLEY TRANSFORM

A. K. TYAVLOVSKY, R. I. VOROBAY, O. K. GUSEV, A. L. ZHARIN, A. D. POVEDAYKO, K. L. TYAVLOVSKY

Аннотация. Для реализации измерений контактной разности потенциалов с использованием цифрового зонда Кельвина в реальном масштабе времени предложено использовать обработку сигнала на основе быстрого преобразования Хартли. В рамках проведенного исследования была создана программная реализация быстрого преобразования Хартли на базе микроконтроллера Atmel Mega 2560. Разработанные алгоритмы и программы обеспечивают дополнительное подавление шумов и паразитных гармоник сигнала, существенное повышение точности определения параметров компенсационной зависимости цифрового зонда Кельвина и, соответственно, точности измерений в целом.

Ключевые слова: сканирующий зонд Кельвина, микроконтроллер, быстрое преобразование Хартли, алгоритм, зондовая электрометрия.

Abstract. Signal processing based on the fast Hartley transform is proposed to implement real-time measurements of the contact potential difference using a digital Kelvin probe. Software implementation of the fast Hartley transform was developed using the Atmel Mega 2560 microcontroller as a basis. The developed algorithms and programs provide additional suppression of noise and parasitic signal harmonics that leads to significant increase in the accuracy of determining the parameters of the of the digital Kelvin probe compensation curve therefore improving the overall measurement accuracy.

Key words: scanning Kelvin probe, microcontroller, fast Hartley transform, algorithm, probe electrometry.

Недостатком традиционного вибрирующего электрометрического зонда Кельвина, реализующего компенсационную схему измерения контактной разности потенциалов (КРП), является низкое быстродействие (большое время установления выходного сигнала), обусловленное инерционностью интегрирующего звена в цепи компенсационной обратной связи, что ограничивает скорость сканирования при картировании поверхности образца таким зондом. Для решения указанной проблемы в конструкции разработанного в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ

что данная особенность не обнаруживалась никакими другими существующими средствами контроля. При этом методы зондовой электрометрии допускают произвольное масштабирование размеров чувствительного элемента электрометрического зонда вплоть до нанометровых размеров, что при необходимости позволяет получить пространственное разрешение на уровне атомно-силовой микроскопии. С другой стороны, увеличение пространственного разрешения при сканирующих измерениях ведет к резкому увеличению времени выполнения измерений, то есть к снижению их производительности. В связи с этим в реальных условиях проведения контроля целесообразно ограничивать разрешающую способность сканирования величиной, достаточной для обнаружения и приближенной оценки концентрации дефектов в пределах шага сканирования без более подробной детализации местоположения обнаруженных дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаронов, Г. В. Совершенствование технологии изготовления зеркал-отражателей из алюминиевых сплавов для лазерных систем передачи энергии / Г. В. Шаронов, Г. А. Гусаков // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–17 нояб. 2017 г. / РИВШ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 255–256.
2. Гост 11141–84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. – Москва: Изд-во стандартов, 1984.
3. Кулагин, Р. Н. Анализ средств контроля поверхностных дефектов при пластической обработке крупногабаритных изделий / Р. Н. Кулагин, Н. В. Федорова, Д. А. Сулейманов // Изв. ВГТУ. – 2014. – Вып. 8 (135), Т. 11. – С. 70–72.
4. Воробей, Р. И. Неразрушающий контроль изделий с прецизионными поверхностями на основе методов зондовой электрометрии / Р. И. Воробей [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 4–17.

E-mail: nil_pt@bntu.by.

УДК 685.31

О НЕОБХОДИМОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАДНИКОВ ДЛЯ ОБУВИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

В. В. ВАСИЛЕВСКАЯ, М. В. ШЕВЦОВА

Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь

UDC 685.31

ON THE NECESSITY OF INPUT CONTROL QUALITY IMPROVEMENT OF SHOE CONTERS WITH THE INSTRUMENTAL METHODS' APPLICATION *V. V. VASILEVSKAYA, M. V. SHEVTSOVA*

Аннотация. В статье проанализирована действующая нормативная база по оценке качества обувных картонов и готовых задников. Показана необходимость в совершенствовании входного контроля качества готовых задников для обуви.

Ключевые слова: обувь, обувные картоны, формованные задники, полуформованные задники, показатели качества.

Abstract. The article analyzes the current regulatory framework for shoe card-board's quality assessment and finished counters. The incoming quality control of finished shoe counters needs to be improved.

Key words: footwear, shoe card-board, molded counters, semi-molded counfers, quality indicators.

Качество обуви определяется широким комплексом свойств, требования к которым зависят в основном от ее вида и назначения. Особенное внимание со стороны потребителей уделяется свойствам обуви, проявляющимся в процессе ее эксплуатации, т. е. эксплуатационным свойствам. Одним из важнейших эксплуатационных свойств обуви является ее формоустойчивость, т. е. сохранение формы в течение всего периода эксплуатации. Формоустойчивость обуви складывается на стадии производства и в основном зависит от формы колодки, свойств используемых материалов, качества выполнения технологических процессов изготовления, в частности, процессов формования заготовки обуви на колодке. В зависимости от места расположения деталей в обуви различают формоустойчивость пяточной и носочно-пучковой частей, при этом, как правило, степень формоустойчивости пяточной части значительно выше носочно-пучковой.

Для обеспечения высокого уровня формоустойчивости обуви большое значение имеют упруго-пластические свойства каркасных деталей обуви, в частности, задника в пяточной части и подноски в носочной части обуви,

которые должны находиться в пределах, достаточных для обеспечения требуемой формоустойчивости обуви в процессе эксплуатации.

В производстве современного ассортимента обуви в качестве каркасных деталей, обеспечивающих фиксацию и формоустойчивость пяточной части обуви, применяются задники, которые изготавливаются из картонов и термопластических материалов и импортируются в Республику Беларусь. На обувные предприятия термопластические материалы поступают в рулонах, из них вырезаются детали задников, которые по соответствующей технологии вклеиваются в пяточную часть заготовки обуви, и производится операция формования на специальном оборудовании для придания заготовке формы пяточной части. Термопластические материалы для задников являются технологичными материалами, однако не достаточно хорошо сохраняют форму пяточной части в процессе носки, так как часто наблюдается появление такого дефекта «оседание задника».

В процессе эксплуатации задники испытывают значительные нагрузки. В процессе ходьбы в обуви при изгибании стопы в плюснефаланговом сочленении, пятка отделяется от стельки и движется вверх, опережая движение пяточной части. При этом часто наблюдается деформирование и истирание поверхности задника. Если спроектированный задник имеет малую жесткость, происходит изгиб задника по стелечному ребру и его оседание. Поэтому задник целесообразно делать из упругого материала, который хорошо восстанавливает свою исходную форму.

Обувные предприятия в большинстве своем по-прежнему отдают предпочтение задникам из обувного картона (рис. 1, а), представляющий собой искусственный материал, состоящий из свойлаченных или склеенных коротких кожевенных, растительных и химических волокон. Необходимо отметить, что кожевенные волокна придают картонам эластичность и кожеподобный вид, а растительные – способствуют большей прочности и жесткости. При этом в настоящее время на предприятия задники поступают уже как детали в готовом виде: формованные и полуформованные с нанесенной термолеевой пленкой или без нее (рис. 1, б).

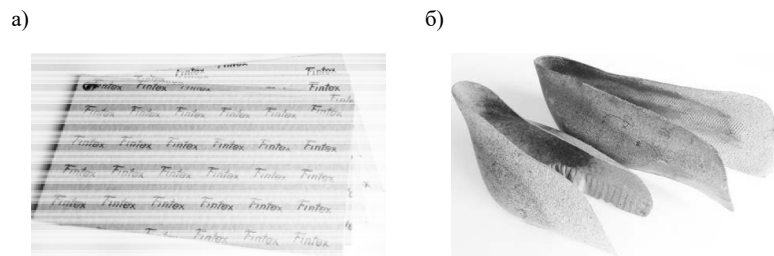


Рис. 1. Внешний вид обувных картонов и задников: а – листы обувного картона; б – формованный и полуформованный задник

Краевой участок поверхности зеркала-отражателя характеризуется в целом аналогичным разбросом значений КРП от 266 до 286 мВ (рис. 4, б), однако пространственное распределение этих значений отличается выраженной неравномерностью, причем более низкие значения КРП, соответствующие повышенным относительным значениям РВЭ, характерны для края образца. Можно сделать вывод, что при близких количественных характеристиках дефектности поверхности на центральных и краевых участках образцов качество поверхности вблизи края зеркала-отражателя несколько снижается по сравнению с его центральной областью, что, очевидно, связано с особенностями технологии обработки поверхности.

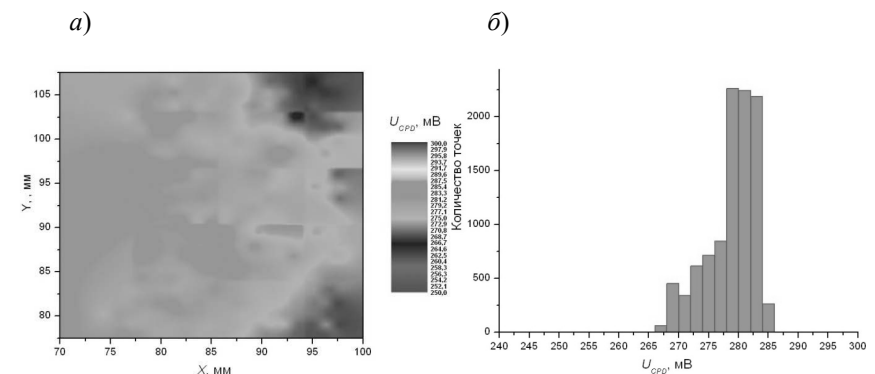


Рис. 4. Распределение КРП краевого участка рабочей поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2, обработанной по методу алмазного лезвийного точения: а – визуализированная карта распределения КРП; б – гистограмма распределения значений КРП

Пространственное разрешение картирования в представленных примерах не превышало 0,5 мм, тогда как характерные размеры присутствующих неоднородностей, по данным атомно-силовой микроскопии, составляли около 1 мкм. Таким образом, в данном случае методы зондовой электрометрии не обеспечивали визуализацию отдельных неоднородностей, а выступали как средство локализации мест (областей) скопления микроскопических дефектов, выявляемых по отклонениям значений КРП в такой области от среднего для поверхности в целом. Благодаря высокой чувствительности электрометрического зонда Кельвина к любым неоднородностям электрофизических свойств поверхности это позволило в данном случае выявить незначительно повышенную дефектность краевых областей металлооптических изделий – поверхности зеркал-отражателей, обработанной по методу алмазного лезвийного точения. Следует отметить,

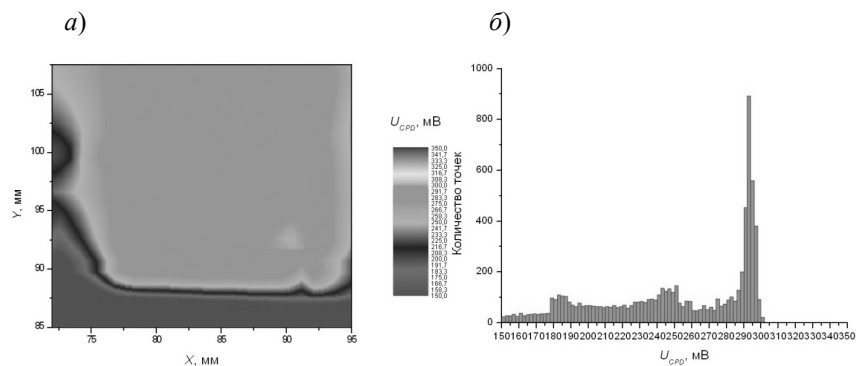


Рис. 2. Распределение КРП рабочей поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2, обработанной по методу алмазного лезвийного точения: а – визуализированная карта распределения КРП; б – гистограмма распределения значений КРП

Для более крупных образцов были выполнены сканирования отдельных участков их рабочей поверхности. Так, на рис. 3. показано распределение КРП центрального, а на рис. 4. – краевого участка поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2. Распределение для центрального участка поверхности на рис. 3, а не содержит каких-либо значимых неоднородностей, которые могут быть соотнесены с дефектами обработки. Значения КРП всех точек в области сканирования укладываются в диапазон от 277 до 291 мВ.

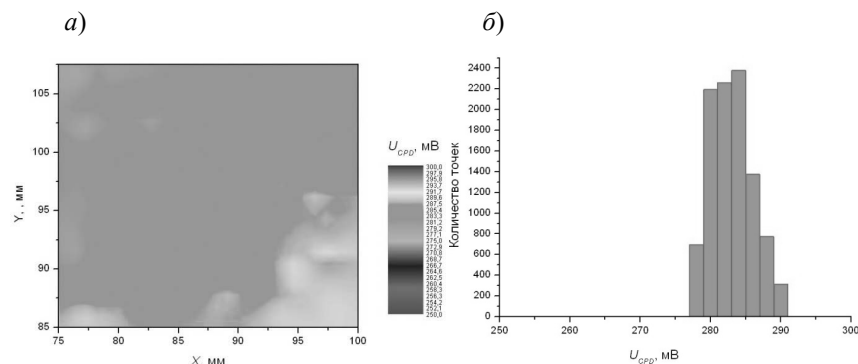


Рис. 3. Распределение КРП центрального участка рабочей поверхности зеркала-отражателя из сплава АМг-2, обработанной по методу алмазного лезвийного точения: а – визуализированная карта распределения КРП; б – гистограмма распределения значений КРП

В Республике Беларусь такие задники изготавливает единственное предприятие – ООО фирма «Новый Век» (г. Витебск). На данном предприятии за рубежом закупается импортные обувные картоны, из которых по специальной технологии под определенный заказ обувного предприятия изготавливаются различные виды формованных и полужформованных задников. К сожалению, данная фирма работает только с зарубежными поставщиками, так как в Республике Беларусь нет своего производства обувных картонов. На белорусском рынке также присутствуют определенные фирмы, поставляющие готовые задники различного производства (Польша, Россия, Италия). При закупке таких задников у производителя обуви возникает вопрос об их качестве в разрезе технологических и эксплуатационных свойств. К задникам предъявляют следующие требования: в основном, это формоустойчивость под действием сжимающих нагрузок и сохранение формы. Задники испытывают активное воздействие со стороны стопы, их эксплуатация происходит в условиях повышенной влажности, воздействий трения и изгибов, что обуславливает строгие требования, применяемые к ним. С точки зрения технологических свойств задники должны обладать упругой деформацией и высокими адгезионными свойствами с основными и вспомогательными обувными материалами. В процессе эксплуатации обуви задник должен обеспечивать формоустойчивость пяточной части, обладать достаточной упругостью, жесткостью, быть стойким к оседанию. На физико-механические свойства задников влияет и наличие в них влаги, поэтому их свойства не всегда стабильны в процессе носки, сопровождающейся увлажнением внутренних деталей. Излишнее содержание влаги ухудшает формоустойчивость обуви, создает неудобства в процессе ее носки, снижается износостойкость подкладки в пяточной части обуви. Следует отметить, что в Республике Беларусь стандартизованные требования применяются в основном только к самим обувным картонам, но не к готовым задникам из них. Качество обувных картонов оценивается в соответствии с ГОСТ 9542–89 *Картон обувной и детали обуви из него. Общие технические условия*, в котором представлена номенклатура показателей и технические требования к картонам различных марок для производства как задников, так и для различных деталей низа (вкладные и основные стельки, полустельки, простилки, подложки). Для методов их определения действует отдельный стандарт ГОСТ 9186–76 *Картон обувной и детали из него. Правила приемки и методы испытаний*, который объединяет в себе краткое описание методов испытаний и ссылки на стандарты с полной методикой проведения испытаний.

В общем виде проведение любого испытания включает несколько этапов: подготовка образцов, проведение испытаний, обработка результатов. Подготовка образцов состоит из вырубания образцов и их кондиционирования. Образцы должны иметь одинаковые линейные размеры, которые контролируются при помощи линейки или штангенциркуля,

в зависимости от допускаемых отклонений. Перед испытаниями образцы выдерживают при относительной влажности воздуха (65 ± 5) % и температуре (20 ± 2) °C в течение 24 ч для стабилизации свойств исследуемых образцов и обеспечения сопоставимости получаемых результатов. Проведение испытания состоит в сообщении образцам требуемой деформации, влажности и других воздействий, с последующей оценкой изменений, происходящих в образцах. Обработка результатов, как правило, включает расчёт среднего арифметического значения зафиксированных изменений, или расчёт показателей, более полно характеризующих свойства материала. Кроме того, расчётный метод позволяет определить значения показателей, не поддающихся непосредственному измерению. Номенклатура показателей качества обувных картонов, формулы для их расчёта, а также оборудование, требуемое для их определения, представлены в табл. 1.

Однако все представленные в таблице показатели качества определяются только для самих обувных картонов, а не для готовых задников. Поэтому для многих предприятий встает вопрос о проведении надлежащего контроля качества закупаемых готовых задников, учитывая тот факт, что поставщики не предоставляют физико-механические характеристики картонов, из которых изготовлены эти задники.

Согласно ГОСТ 9186–76 *Картон обувной и детали из него. Правила приемки и методы испытаний* для готовых задников предложено лишь измерение геометрических параметров (высота задника, толщина и ширина верхнего спущенного края), а из физико-механических свойств – определение устойчивости задников к оседанию по ГОСТ 11149–75 *Детали обуви из картона. Метод определения устойчивости задников к оседанию*. Стандарт распространяется только на формованные с четко выраженной гранью задники из обувного картона для всех видов бытовой обуви (кроме легкой), а метод заключается в измерении значения остаточной деформации (оседания) предварительно увлажненных задников после воздействия заданного количества циклов нагрузки. Однако, как показывает практика, этого недостаточно. В процессе производства обуви важно, чтобы задники обязательно обладали достаточными адгезионными свойствами, а также при формовании пяточной части они претерпевают процессы нагревания и прессования. Поэтому в настоящее время назрела необходимость в разработке новых экспресс-методов определения адгезионной способности и формоустойчивости готовых формованных и полуформованных задников.

При разработке номенклатуры показателей качества необходимо руководствоваться принципами полноты и достаточности: перечень показателей должен в полной мере характеризовать значительные свойства объекта исследования. Совершенствование номенклатуры должно заключаться не в бесконечном расширении показателей, а в замене менее информативных, на в большей мере, отображающие свойства объектов и учитывающие условия их эксплуатации.

вибрирующего электрометрического зонда Кельвина и включает в себя малогабаритный чувствительный элемент, составляющий подвижную обкладку динамического измерительного конденсатора, пьезоэлектрический привод вибрации и электронный узел обработки измерительного сигнала.



Рис. 1. Измерительный преобразователь, реализующий схему измерений КРП с неполной компенсацией сигнала чувствительного элемента

Картирование поверхности образца обеспечивалось за счет его размещения на подвижном столике, перемещаемом двухкоординатной сканирующей системой на основе шаговых двигателей. Величина зазора зонд-образец в процессе сканирования составляла 0,2 мм, измерения являлись полностью бесконтактными.

Исследования пространственного распределения КРП рабочей поверхности металлооптических деталей (зеркал-отражателей) из сплава АМг-2, обработанных по методу алмазного лезвийного точения, выполненные с использованием описанного измерительного преобразователя, показали высокую однородность такого распределения. Визуализация результатов картирования поверхности одного из исследованных образцов (зеркала-отражателя квадратной формы с поперечными размерами 20 × 20 мм) показана на рис. 2, а. На рис. 2, б приведена гистограмма распределения измеренных значений КРП.

Можно видеть, что вне пределов обработанной алмазным лезвийным точением поверхности значения КРП распределены в широком диапазоне от 150 до 286 мВ. Значения КРП обработанной поверхности демонстрируют на порядок меньший разброс и находятся в пределах от 286 до 300 мВ с преобладанием значений 292...294 мВ.

оптическими, вихретоковыми, магнитными и радиационными методами, которые относятся к неразрушающим методам контроля, однако применение ряда перечисленных методов связано с существенными ограничениями (так, вихретоковые и магнитные методы не обеспечивают выявление дефектов вблизи краев образца, а также не позволяют осуществлять картирование поверхности образца с визуализацией пространственного распределения дефектов; радиационные методы не обеспечивают различение дефектов поверхности и объема образца), в том числе обусловленными требованиями безопасности [3]. При этом пространственная разрешающая способность указанных методов не обеспечивает контроль микродефектов поверхности после прецизионных операций чистовой обработки, при которых характерные размеры дефектов составляют менее 1 мкм (порядка длины волны оптического излучения видимого диапазона и менее). Наивысший класс чистоты поверхности оптических деталей 0–10, установленный ГОСТ 11141–84, предусматривает наличие дефектов поверхности с минимальными размерами от 2 мкм, причем стандартом не предусмотрены методы контроля таких дефектов на отражающих поверхностях [2]. В работе [1] для выявления и анализа дефектов обработки поверхности по методу алмазного лезвийного точения использовался метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). При исключительно высоких чувствительности и разрешающей способности метод АСМ обеспечивает контроль только небольшого участка поверхности образца, причем расположение контролируемого участка не может быть определено с достаточной точностью, что делает данный метод непригодным для решения задач технологического контроля.

Для решения проблемы контроля дефектов суперфинишной обработки поверхности металлооптических изделий, включая визуализацию пространственного распределения дефектов алмазного лезвийного точения, было предложено использовать метод сканирующей зондовой электрометрии, основанный на регистрации пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) поверхности с помощью сканирующего зонда Кельвина [4]. Величина КРП тесно связана с такой фундаментальной характеристикой поверхности твердого тела, как работа выхода электрона (РВЭ) с поверхности, и количественно определяется разностью значений РВЭ контролируемого участка поверхности и чувствительного элемента зонда Кельвина. Последняя в общем случае представляет собой неизвестную, но постоянную величину, что позволяет трактовать результаты измерений как относительные значения РВЭ, а построенная на их основе карта распределения КРП может рассматриваться как визуализация пространственного распределения РВЭ контролируемой поверхности.

Внешний вид использовавшегося в исследовании измерительного преобразователя показан на рис. 1. Преобразователь реализует схему

Табл. 1. Номенклатура показателей качества обувных картонов, формулы для их расчёта и приборная база для их определения

Наименование показателя	ГОСТ на метод определения	Формула для расчёта	Приборная база
1. Плотность, г/см ³	ГОСТ 9186	$P = 0,4 \frac{m}{h},$ где m – масса испытуемого образца картона, г; h – толщина испытуемого образца картона, мм	Толщиномер, весы лабораторные, линейка металлическая
2. Жёсткость при статическом изгибе, Н (в машинном и поперечном направлениях)	ГОСТ 9187	Нагрузка, необходимая для изгиба образца	Разрывная машина, толщиномер или микрометр, приспособление изгибающее, линейка и штангенциркуль
3. Предел прочности при растяжении, МПа (или кгс/мм ²) (в машинном и поперечном направлениях)	ГОСТ 13525.1	$\sigma = \frac{F}{b \cdot h},$ где F – разрушающее усилие, Н; b – ширина образца, равная 10 мм; h – толщина образца, мм	Разрывная машина, толщиномер, штангенциркуль, секундомер
4. Относительное удлинение при растяжении в сухом состоянии, % (в машинном и поперечном направлениях)	ГОСТ 13525.1	$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100,$ где Δl – среднее арифметическое значение удлинения всех испытуемых образцов, мм; l_0 – номинальное расстояние между зажимами, равное 50 мм	Разрывная машина, секундомер
5. Намокаемость за 2 ч, %	ГОСТ 8972	$H = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100,$ где m – масса образца до намокания, г; m ₁ – масса образца после 2 ч намокания, г	Весы лабораторные, линейка
6. Изменение линейных размеров при увлажнении или высушивании, мм (в машинном и поперечном направлениях)	ГОСТ 9186	$L_y = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \quad L_b = \frac{l_0 - l_1}{l_0},$ где L ₀ – длина образца до увлажнения или высушивания, мм; L ₁ – длина образца после увлажнения или высушивания, мм	Термостат, эксикатор, штангенциркуль или линейка металлическая

Окончание табл. 1

Наименование показателя	ГОСТ на метод определения	Формула для расчёта	Приборная база
7. Гигроскопичность, %	ГОСТ 8971	$\Gamma = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100,$ где m – масса элементарной пробы до поглощения влаги, г; m_1 – масса элементарной пробы после поглощения влаги, г	Эксикатор, весы лабораторные
8. Влаготдача, %	ГОСТ 8971	$B = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100,$ где m – масса элементарной пробы до поглощения влаги, г; m_1 – масса элементарной пробы после поглощения влаги, г; m_2 – масса элементарной пробы после отдачи влаги, г	Эксикатор, весы лабораторные
9. Влажность, %	ГОСТ 13525.19	$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100,$ где m_1 – масса образца картона до высушивания, г; m_2 – масса образца картона после высушивания, г	Весы, сушильный шкаф
10. Истираемость во влажном состоянии в поперечном направлении, мм/мин	ГОСТ 9188	$X = \frac{h_0}{K \cdot n} \cdot N,$ где h_0 – первоначальная толщина образца в воздушно-сухом состоянии, мм; n – число циклов трения за время испытания; K – коэффициент, равный 2 (при истирании на 1/2 толщины образца) или 3 (при истирании на 1/3 толщины); N – число циклов трения за 1 мин	Прибор типа ИКС-2, микрометр или толщиномер, линейка металлическая и штангенциркуль, твердомер, эксикатор
11. Формуемость, мм	ГОСТ 9542	Высота концов изогнутого образца через (60 ± 5) с после освобождения из пресс-формы	Пресс-форма, термошкаф, линейка металлическая
12. Формоустойчивость, мм	ГОСТ 9542	Высота концов изогнутого образца через (120 ± 10) мин после освобождения из пресс-формы	Пресс-форма, термошкаф, линейка металлическая

УДК 621.7.08

КАРТИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ**А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, О. К. ГУСЕВ, К. В. ПАНТЕЛЕЕВ,
К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ, А. И. СВИСТУН, А. Л. ЖАРИН**Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.7.08

MAPPING DEFECTS OF PRECISION SURFACES USING PROBE ELECTROMETRY METHODS**A. K. TYAVLOVSKY, O. K. GUSEV, K. U. PANTSIALEYEU, K. L. TYAVLOVSKY,
A. I. SVISTUN, A. L. ZHARIN**

Аннотация. Рассмотрено использование методов зондовой электрометрии (в частности, сканирующего зонда Кельвина) для неразрушающего контроля дефектов обработки поверхности металлооптических изделий высшего класса чистоты. Показано, что применение таких методов обеспечивает выявление и картирование малоразмерных дефектов, не обнаруживаемых другими средствами неразрушающего контроля, в том числе при характерных размерах дефектов много меньше разрешающей способности картирования. В последнем случае определяется факт наличия и – оценочно – концентрация дефектов в некоторой области, соответствующей шагу сканирования.

Ключевые слова: поверхность, класс чистоты, неразрушающий контроль, алмазное лезвийное точение, зондовая электрометрия.

Abstract. To solve the problem of non-destructive testing of highest cleanliness class surfaces of metallic optical items the probe electrometry methods, in particular scanning Kelvin probe technique, are considered. Such methods provide the detection and mapping of small-sized defects inaccessible to other non-destructive testing techniques, including those with characteristic sizes much less than the mapping resolution. In the latter case the available information include defect presence and estimated defect concentration in some area corresponding to the scan step.

Key words: surface, cleanliness class, non-destructive testing, diamond blade turning, probe electrometry.

Современные технологии финишной обработки поверхности, в частности, технология алмазного лезвийного точения, применяемая при изготовлении металлооптических изделий, обеспечивают исключительно высокую чистоту поверхности. Так, при суперфинишной обработке зеркал-отражателей из сплава АМг-2 для мощных лазеров достигается параметр шероховатости R_z в пределах от 1 до 3,1 мкм [1]. В то же время действующие нормативные документы оговаривают способы контроля чистоты металлических поверхностей только до V класса чистоты поверхности (ширина дефектов типа «царапины» от 6 мкм, диаметр точечных дефектов от 20 мкм) [2]. Эффективное выявление таких дефектов возможно

выборочное включение в модель уточняющих факторов, таких как учет насыщения магнитной цепи, эллиптического кругового магнитного поля статора, переменных параметров схемы замещения и т. д);

– использование математического аппарата, заложенного в данное ПО, для создания прошивки ПЧ, которая будет учитывать тепловое состояние АД и автоматического регулирования расхода охлаждающего воздуха для интенсивного отвода тепловых потерь, для поддержания теплового режима АД на заданном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Peresada, S.** Adaptive observers for self-commissioning of induction motor drives: Theory and experiment / S. Peresada, S. Kovbasa, D. Prystupa // 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2–6 June 2014. – Kyiv, 2014. – P. 240–245.
2. **Castaldi, P.** Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring / P. Castaldi, A. Tilli // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2005. – Vol. 13, № 3. – P. 386–400.
3. **Третьяков, А. С.** Разработка уточненной электромагнитной модели асинхронного электродвигателя / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов, Г. С. Ленецкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 69–77.
4. **Третьяков, А. С.** Моделирование тепловентиляционных режимов работы асинхронных электродвигателей при питании от синусоидального источника напряжения / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2018. – № 2 (73). – С. 66–73.

E-mail: loggie121@gmail.com.

УДК 62-192:004.896

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н. М. ВЕСЕЛОВА, Д. В. ЗЕЛЯКОВСКИЙ

Волгоградский государственный аграрный университет
Волгоград, Россия

UDC 62-192:004.896

INTELLIGENT METHODS OF DIAGNOSTICS OF POWER EQUIPMENT

N. M. VESELOVA, D. V. ZELYAKOVSKY

Аннотация. Рассмотрены существующие интеллектуальные системы диагностики электрооборудования. Выявлены основные недостатки данных систем. Определены побуждающие мотивы и векторы развития систем диагностики сложных технических объектов.

Ключевые слова: диагностика электрооборудования, интеллектуальные системы, нейронные сети, функциональное состояние оборудования, динамические модели.

Abstract. The existing intelligent systems for diagnostics of electrical equipment are considered. Are identified the main disadvantages of these systems. Motivating and vectors of development of diagnostics systems for complex technical objects are determined.

Key words: diagnostics of electrical equipment, intelligent systems, neural networks, functional state of equipment, dynamic models.

Многие электросетевые компании несут убытки во время незапланированных простоев из-за плохой или неправильной организации диагностики электрооборудования. Современная диагностика состояния оборудования, как правило, основывается на мониторинге данных о параметрах работы оборудования, аварийных случаях, аномалиях в отношении заданных диапазонов управления оборудованием. Предиктивная диагностика позволяет распознавать внезапные всплески параметров работы оборудования и их необычное сочетание, что в свою очередь дает возможность эффективно запланировать профилактическое обслуживание. Такие действия требуют точных и непрерывных потоков входных данных из самых разнообразных датчиков.

Вопросы диагностики электрооборудования могут решить интеллектуальные системы. При разработке данных систем производители руководствуются следующими принципами [1]:

- принцип предоставления требуемого количества и качества информации для наблюдаемости состояния оборудования;
- принцип достаточности числа датчиков;
- принцип информационной полноты вторичных признаков состояния оборудования;

- принцип инвариантности (селекции первоочередных диагностических признаков отказа оборудования);
- принцип самодиагностики измерительных и управляющих каналов;
- принцип структурной гибкости и программируемости;
- принцип коррекции недельных измерительных систем;
- принцип дружелюбности интерфейса;
- принцип многоуровневости.

На отечественном рынке сегодня уже существуют интеллектуальные системы диагностики, позволяющие проводить контроль, анализ технического состояния оборудования и выработать решения о необходимости обслуживания или ремонта оборудования. К ним относятся: «Диагностика+» ИГУ, «СМТО» ООО «АСУ-ВЭИ», «ЭДИС Альбатрос» УрФУ, «НЕВА-АСКДТ» НПФ «ЭНЕРГОСОЮЗ», «ЭСКИСО» МЭИ (г. Смоленск), «ВЕЛЕС» ООО «Мониторинг и автоматика», «ЭСМДУ-ТРАНС» ПАО «ЗТР», «СУПА» Холдинг «Россети». Все эти системы отличаются областью и методами решаемых задач, а также организацией и базой данных. Перед пользователями в связи с этим стоит сложность в выборе и предпочтении той или иной системы. К тому же они имеют, как показала практика, недостаточно мощные базы данных.

С учетом вышесказанного предлагается остановиться на новых методах и алгоритмах, основанных на анализе больших массивов данных и выработке решений, то есть созданных на базе искусственных нейронных сетей [2]. В основе построения этих сетей используются аналитические модели отдельных агрегатов, отдельных узлов и отдельного оборудования. Согласно аналитической модели, связь между выходными параметрами оборудования, находящегося в исправном состоянии, его структурными параметрами и внешними воздействиями описывается выражением векторной функции, которая представляет собой систему передаточных функций [3]:

$$\dot{V} = \varphi(\dot{X}; \dot{Y}_{\text{нач}}; t), \quad (1)$$

где $\dot{V}$ – вектор выходных параметров оборудования; $\dot{X}$ – вектор управляющих воздействий; $\dot{Y}_{\text{нач}}$ – вектор начальных значений структурных параметров оборудования; t – время нахождения оборудования в исправном состоянии.

По аналогии можно записать выражение системы передаточных функций для оборудования, находящегося в неисправном состоянии q :

$$\dot{V}_q = \varphi_q(\dot{X}; \dot{Y}_{\text{нач } q}; t_q). \quad (2)$$

Четвертый модуль предназначен для расчета энергетических характеристик АД. Здесь определяются параметры энергетической диаграммы АД:

- входная мощность АД;
- потери в статоре АД;
- потери в роторе АД;
- выходная мощность АД;
- прочие потери, необходимые для дальнейших расчетов.

Входная мощность определяется на основании измеренных токов и напряжений на статоре двигателя. Потери в статоре и роторе рассчитываются по методике, изложенной в [3]. Выходная мощность определяется на основании измеренных показаний скорости и момента. Опционально можно найти коэффициент мощности и коэффициент полезного действия.

В случае расчетов для определения выходной мощности используется синтезированный наблюдатель состояния, целью которого является восстановление сигнала скорости. Момент точно вычисляется на основании заложенного алгоритма.

Итогом работы данного модуля является набор параметров потерь в отдельных узлах АД, которые будут использованы в следующем модуле.

Пятый модуль основной, он предназначен для идентификации и прогноза тепловентиляционных режимов работы АД. В его основе лежит метод эквивалентных тепловых схем замещения [4]. В зависимости от решаемой задачи выбирается требуемая m -массовая система однородных тел, на основании которой составляется система дифференциальных уравнений. В данной системе уже учтена взаимосвязь тепловых и вентиляционных режимов работы АД. На основе данных, получаемых из предыдущих модулей, идет расчет температур отдельных узлов АД. С учетом тепловой инерционности формируется сигнал на ПЧ для увеличения / уменьшения скорости вращения ротора, что в конечном счете приводит к увеличению / уменьшению объема воздуха, поступающего в АД для интенсивного отвода тепловых потерь. Большей функциональности можно достигнуть, применяя наездники – электроприводы вращения вентиляторов, работающих независимо от самого АД и монтирующихся в зоне основного вентилятора АД.

Последний модуль представляет собой сводный отчет по итогам работы программы, в котором отображаются все основные переменные, снятые или рассчитанные, на основе которых можно судить о текущем состоянии АД.

В качестве дальнейшего развития программы можно выделить следующее:

- расширение функционала модуля расчета электромагнитных режимов АД (использование трехфазной математической модели,

работы ПО. Можно загрузить, выгрузить, удалить, преобразовать исходные данные и вывести их на печать.

Второй модуль необходим для идентификации параметров Т-образной схемы замещения АД. Это связано с тем, что для работы любого преобразователя частоты (ПЧ) необходимо знать эти данные для корректной работы выбранного закона частотного управления. При подключении двигателя в первый раз ПЧ производит так называемую идентификацию – определение параметров Т- или Г-образной схемы замещения АД по заранее заложенному в него алгоритму.

В качестве идентифицируемых параметров Т-образной схемы замещения АД выступают:

- активное сопротивление фазы статора;
- приведенное к статору активное сопротивление фазы ротора;
- реактивное сопротивление фазы статора;
- приведенное к статору реактивное сопротивление фазы ротора.

Алгоритм, заложенный в данное ПО, основывается на математическом аппарате, представленном в [1].

Сам эксперимент проходит в несколько стадий. На первой стадии ПЧ подает на двигатель напряжение постоянного тока не более 24 В, после чего методом вольтметра-амперметра определяется сопротивление фазы статора. На втором ПЧ формирует специальный полигармонический сигнал, который будет подаваться на АД.

Вначале на АД подается кратковременный импульс постоянного тока для подмагничивания магнитной системы, а далее – сформированные по заданному управляющему сигналу напряжения на статор электродвигателя. При этом двигатель не стартует и железо магнитопроводов статора и ротора не входит в насыщение (при этих условиях можно считать, что параметры схемы замещения неизменны). Далее считываются показания напряжений и токов на статоре и передаются на персональный компьютер, где происходит обработка данных. Расчет заканчивается, когда достигается необходимая точность. При этом итоги расчета отображаются как в текстовом, так и в графическом виде – в виде трендов.

В случае использования текстовых файлов заранее моделируются и переводятся в массивы данные полигармонические сигналы токов и напряжений. При запуске расчета из этих файлов считываются массивы данных, и на их основе проводится идентификация параметров схемы замещения.

Данный модуль является источником данных для остальных модулей.

Третий модуль предназначен для расчета электромагнитных режимов АД. В его основе лежит двухфазная математическая модель в осях α - β [2, 3]. Входными являются параметры Т-образной схемы замещения, выходными – токи, скорость и момент.

Фактическая передаточная функция оборудования по j параметру имеет вид:

$$\dot{Y}_j = \varphi(\dot{X}_j; \dot{Y}_{\text{нач}j}; t). \quad (3)$$

В системах технической диагностики элементы принятия решения на основе данных передаточной функции классифицируют состояние диагностируемого объекта как исправное либо неисправное. В случае обнаружения неисправности такие элементы проводят идентификацию неисправного элемента и определяют причину отказа.

Так, например, существуют системы, определяющие функциональное состояние оборудования при помощи структурных параметров [4]. В состав этих систем входит следующее: группа блоков памяти; дифференцирующий элемент; группа блоков элементов И; группа блоков сравнения. В свою очередь третья группа складывается из элементов регистров памяти, сумматоров, блоков элементов И, блоков элементов ИЛИ, компаратора и инвертора, элемента ИЛИ.

На входы компаратора второй и третьей групп поступают значения нижней и верхней границ допустимых структурных параметров. Далее в компараторе проходит сравнение:

$$Y_j^{\max} > Y_j > Y_j^{\min}, \quad (4)$$

где $Y_j^{\max}$ и $Y_j^{\min}$ – соответственно верхняя и нижняя границы диапазона значений j -го параметра.

При невыполнении условия (4) подключается второй выход компаратора, выходящий сигнал которого имеет расширенные области по определению функционального состояния:

$$3\delta \cdot Y_j^{\max} > Y_j > 3\delta \cdot Y_j^{\min}. \quad (5)$$

Достоверность принятия решения определяется через вероятность ошибки контроля:

$$\Delta = 1 - P_{\text{ош}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ош}}$ – вероятность ошибки, $P_{\text{ош}} = \alpha + \beta$; α – ошибка первого рода, вероятность ошибочного признания объекта контроля неисправным; β – ошибка второго рода, вероятность ошибочного признания объекта контроля исправным.

Данный метод определения функционального состояния оборудования имеет недостаток, заключающийся в том, что здесь предполагается

распределение параметров X_j по нормальному закону. А это значит, что примерно 99 % значений параметров попадет в доверительный интервал (5), в то время как при отказах объектов законы статического распределения могут меняться, также могут меняться и сами значения параметров.

Отказ элемента в сложной технической системе влияет на ее работоспособность по-разному, и здесь уже недостаточно прибегать только к определению допускового состояния элемента для диагностики всей системы.

Например, фирма «Сименс» разработала способ анализа работы сложной технической системы (многоступенчатого компрессора газовой турбины), в которой несколько нейронных сетей обучаются, основываясь на нормальном режиме работы турбины [5]. Здесь входными параметрами являлись не только статические величины параметров с датчиков измерения, но и динамические параметры. Причем динамический сигнал давления подвергался частотному анализу, посредством чего определялся один или более параметров частотного спектра сигнала давления. Базируясь на статических, динамических данных измерений и частотном спектре сигнала, обучается нейронная сеть, выходной величиной которой является, по меньшей мере, один показатель диагностики, который представляет меру вероятности нормального режима работы технической системы в зависимости от входных величин.

Недостатком этого способа является то, что в нем нет возможности дополнительного обучения, самоорганизации и реконфигурирования нейронной сети в процессе работы технической системы, так как результат диагностики оборудования и его достоверность зависят от обучающей выборки.

Более совершенной, по сравнению с предыдущими, является система, содержащая один или более динамический модуль. Наличие динамического модуля при контроле работы сложного технического объекта выявляет в рабочих параметрах или рабочих и структурных параметрах системы зависимости между рабочими параметрами или рабочими и структурными параметрами посредством методов искусственного интеллекта и интегрирует идентифицированные при этом зависимости в динамическую модель в качестве новых зависимостей и тем самым улучшает ее в отношении повышения точности прогнозирования поведения системы [6]. Динамическая модель включает в себя механизм управления, нейронную сеть, логику, генетический алгоритм, графическую характеристику.

Расширение (улучшение) динамической модели посредством добавления новых входных и выходных параметров требует наращивания нейронной сети. При недостаточном размере нейронной сети могут возникнуть затянутое во времени обучение и появление сбоев.

Задачу по использованию «совершенной» нейронной сети для диагностики оборудования в динамической модели можно решить путем

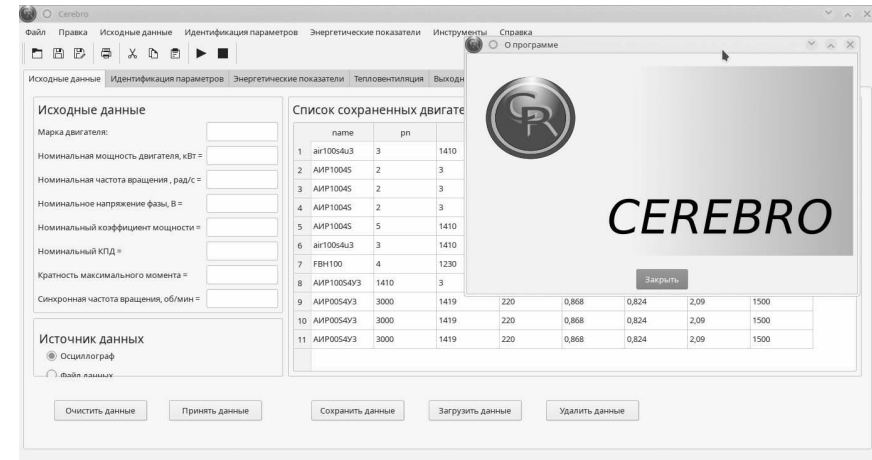


Рис. 1. Внешний вид программного обеспечения для идентификации теплового состояния асинхронного двигателя

Данное ПО написано на кроссплатформенном фреймворке qt5 под Linux, может быть портировано на Windows и Mac OS и имеет два основных режима работы:

1) использование в качестве исходных данных заранее сформированных txt-файлов (возможно использование и других форматов, например, csv);

2) использование в качестве исходных данных сигналов токов, напряжений, скорости, момента, температур отдельных узлов асинхронного электродвигателя, с которого снимаются эти параметры. В данном случае используется блок ввода аналоговых сигналов с их последующей оцифровкой.

Другими словами, первый режим работы позволяет просчитать, а второй – экспериментально в реальном времени определить и спрогнозировать тепловентиляционные режимы.

В состав данного ПО входят следующие модули:

- 1) модуль исходных данных;
- 2) модуль идентификации параметров Т-образной схемы замещения АД;
- 3) модуль расчета электромагнитных режимов АД;
- 4) модуль расчета энергетических характеристик АД;
- 5) модуль идентификации и прогноза тепловентиляционных режимов работы АД;
- 6) модуль результатов работы программы.

Модуль исходных данных представляет собой базу данных, в которой хранится марка двигателя, его параметры и параметры, необходимые для

Недостатком такой системы может стать непредвиденный сбой нейронной сети и потеря избыточных нейронов без восстановления.

Следует отметить, что на практике искусственный интеллект используется только для диагностики сложного дорогостоящего оборудования, так как использовать нейронные сети для простых механизмов экономически нецелесообразно. Кроме этого, рассмотренные методы диагностики сводятся к определению функциональности оборудования на определенном этапе времени, без прогнозирования. Поэтому при диагностике оборудования с использованием искусственных нейронных сетей необходимо дополнительно ставить задачи по осуществлению мониторинга следующих показателей:

- оценка функции надежности оборудования во времени;
- оценка функции риска отказа оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов: учебное пособие / А. Г. Дмитриенко [и др.]; под ред. Д. И. Нефедьева, Б. В. Цыпина. – Пенза: ПГУ, 2013. – 62 с.
2. Интеллектуальные технологии диагностики оборудования промышленных предприятий / В. В. Кузьмин [и др.] // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума, 25–31 мая 2015 г. – Пенза, 2015. – Т. 2. – С. 28–29.
3. **Науменко, А. П.** Теория и методы мониторинга и диагностики: материалы лекций / А. П. Науменко. – Омск: ОмГТУ, 2018. – 135 с.
4. Устройство для допускового контроля функциональных состояний технических систем: пат. RU 2222823 / А. И. Полоус, А. Г. Волков, А. С. Бурый. – Оpubл. 27.01.2004.
5. Способ анализа функционирования газовой турбины: пат. RU 2480806 / Пфайфер Уве (DE), Штерцинг Фолькмар (DE). – Оpubл. 27.04.2013.
6. Устройство и способ для контроля технической установки, содержащей множество систем, в частности установки электростанции: пат. RU 2313815 / Фик Вольфганг (DE), Аппель Мирко (DE), Герк Уве (DE). – Оpubл. 27.12.2007.
7. Способ и устройство технической диагностики сложного технологического оборудования на основе нейронных сетей: пат. RU 2563161 / Ю. М. Соломенцев, С. А. Шептунов, И. С. Кабак, Н. В. Суханова. – Оpubл. 20.09.2015.

исследуемого листового проката, величина коэффициента корреляции составляет 0,83, что является достаточно высоким показателем для того, чтобы утверждать наличие статистической связи между рассмотренными величинами.

Таким образом, проведенные исследования показали, что величину механической анизотропии листового проката, а именно сумму коэффициентов анизотропии R , измеренных в направлениях 0 и 90° относительно направления прокатки, можно достаточно точно оценить по относительной разнице между величинами градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, на некотором расстоянии от центра намагничивания. На точность такого способа оценки механической анизотропии сильное влияние оказывает неоднородность свойств листового проката сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современное состояние неразрушающего контроля механических свойств и штампуемости листового проката сталей в технологическом потоке производства / В. Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 5. – С. 19–60.
2. **Матюк, В. Ф.** Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей / В. Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 3. – С. 15–42.
3. **Шевелев, В. В.** Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку / В. В. Шевелев, С. П. Яковлев. – Москва: Машиностроение, 1972. – 133 с.
4. Оценка свойств автолистовой стали по n и R факторам / Ю. Д. Железнов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 4. – С. 18–20.
5. **Бурак, В. А.** Анизотропия магнитных свойств листового проката из стали 35 / В. А. Бурак, В. Ф. Матюк, А. С. Счастный // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2019. – № 3. – С. 17–31.
6. **Счастный, А. С.** Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А. С. Счастный, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.
7. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В. Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 62–74.

E-mail: veronika.burak@gmail.com.

намагничивания аналогичные величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности заметно различаются. В [5] было показано, что расстояние, на котором это различие максимально, зависит от параметров системы намагничивания.

На рис. 2 представлена зависимость максимальной относительной разницы $\delta_{\nabla H}$ между величинами градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, от суммы коэффициентов анизотропии R , измеренных в направлениях 0 и 90° относительно направления прокатки. Для датчика прибора ИМА-6 расстояние, на котором определяется величина $\delta_{\nabla H}$, составляет приблизительно 55 мм от центра намагничивания. Выбор в качестве оценки механической анизотропии суммы коэффициентов корреляции, измеренных в двух перпендикулярных направлениях, основывается на том, что при изучении распределения остаточной намагниченности рассматриваются только направления вдоль и поперек прокатки, для которых характерна наибольшая деформация зерна структуры при прокатке.

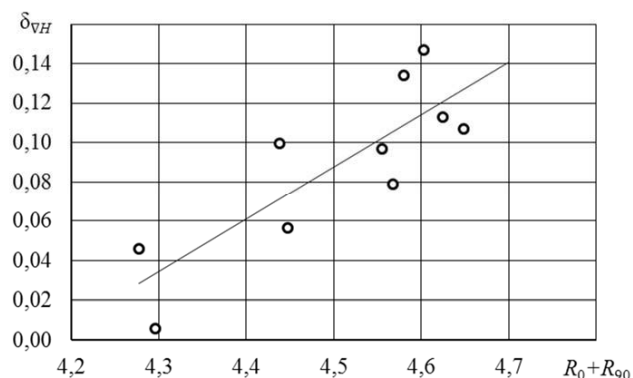


Рис. 2. Зависимость величины максимальной относительной разницы между величинами градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, от суммы коэффициентов анизотропии $R_0 + R_{90}$

Для представленной на рисунке зависимости характерен однозначный рост значений относительной разницы между величинами градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, с увеличением суммы коэффициентов анизотропии в тех же направлениях. Несмотря на большой разброс значений, который можно объяснить неоднородностью механических и магнитных свойств, измеренных в разных областях

УДК 621.81

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

**Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ,
К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ, Л. И. ШАДУРСКАЯ**

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.81

FUNCTIONAL PHOTOELECTRIC CONVERTERS FOR OPTICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS

**R. I. VOROBAY, O. K. GUSEV, A. K. TYAVLOVSKY, K. L. TYAVLOVSKY,
L. I. SHADURSKAYA**

Аннотация. Рассмотрены особенности фотоэлектрических преобразователей с собственной фотопроводимостью на основе полупроводников с глубокой многозарядной примесью. Использование таких структур позволяет существенно расширить динамический диапазон чувствительности и получить новые функциональные свойства одноэлементных фотоприёмников и измерительных преобразователей оптической диагностики на их основе.

Ключевые слова: оптическая диагностика, фотоэлектрический преобразователь, переключение характеристик, собственная проводимость, многозарядная примесь.

Abstract. The features of photovoltaic cells in semiconductors with deep-level multiply-charge impurity have been considered. The use of such structures can significantly extend the dynamic range of sensitivity and gain new functional properties of single-element photoelectric receivers and optical diagnostics measuring transducers based on them.

Key words: optical diagnostics, photoelectric converter, switching characteristics, intrinsic conductivity, multiply charge impurity.

Оптические методы диагностики [1] применяются как для определения разнородных характеристик изделия – от его геометрических размеров до химического состава, так и для контроля технологических и физических процессов, обеспечивая неразрушающий характер контроля. При этом избранная методика контроля, свойства объекта контроля и среды передачи оптического излучения определяют требования к совокупности свойств источника и приемника излучения. Таким образом, возможности оптических методов диагностики определяются, в основном, функциональными возможностями и параметрами фотоэлектрического преобразователя (ФЭП). Представляется перспективным использование в измерительных преобразователях систем оптической диагностики полупроводниковых ФЭП с изменяемой функциональностью и переключением поддиапазонов преобразования [2, 3] энергетической и спектральной характеристик

чувствительности под действием внешних управляющих факторов и параметров измерительного сигнала.

Основу ряда функциональных ФЭП, пригодных для применения в системах оптической диагностики, составляют базовые фоторезистивные и барьерные структуры с использованием контактов металл–полупроводник. В качестве основного материала ФЭП предлагается использовать полупроводники с низкой концентрацией глубокой примеси [3], формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, с поверхностно-барьерной или резистивной структурой (рис. 1). Использование физической интеграции процессов внутри объема чувствительного элемента и его приповерхностной области позволяет сформировать ряд уникальных свойств таких ФЭП при простой конструкции приборной структуры.

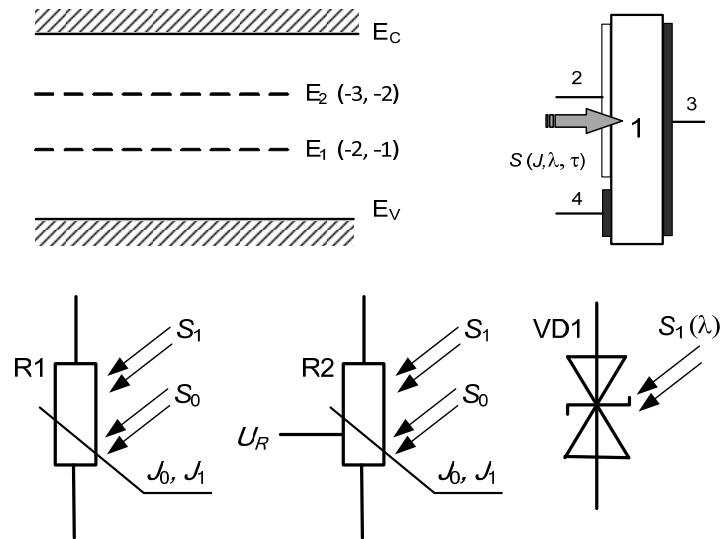


Рис. 1. Зонная диаграмма полупроводника с многозарядными примесными центрами (в скобках указаны зарядовые состояния) и приборная структура ФЭП на его основе: S_1 – информационный сигнал; S_0 – управляющее воздействие

Структура, приведенная на рис. 1, где 1 – это полупроводник с многозарядными примесными центрами; 2 – прозрачный электрод; 3 – электрод; 4 – управляющий электрод, является базовой и, в зависимости от требований к функциональности ФЭП, может быть модифицирована. Так, электроды могут быть выполнены как омическими, так и в виде барьеров Шоттки, причем их количество и пространственное расположение также может меняться (рис. 2).

целью исследования является оценка связи между коэффициентами анизотропии механических свойств и величинами, описывающими магнитную анизотропию по характеристикам поля остаточной намагниченности.

Исследования проводились на образцах стального листового проката, имевших размеры $1000 \times 1000 \times 0,8$ мм. Для каждого из образцов были измерены коэффициенты анизотропии в направлениях 0, 45 и 90° относительно направления прокатки, рассчитаны коэффициенты нормальной анизотропии. Данные образцы являлись конечным продуктом металлургического производства, их изготовление отражало реальную ситуацию, связанную с неоднородностью механических свойств, возникающих в процессе прокатки. При выборе образцов для исследования учитывались критерии однородности образцов, изложенные в [6].

Импульсное намагничивание исследуемых образцов осуществлялось полем амплитудой 250 кА/м, формируемым прибором ИМА-6 [7]. Затем феррозондом-градиентометром прибора измерялись распределения величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности на поверхности стальных листов вдоль и поперек направления прокатки. Результаты измерения для двух образцов представлены на рис. 1.

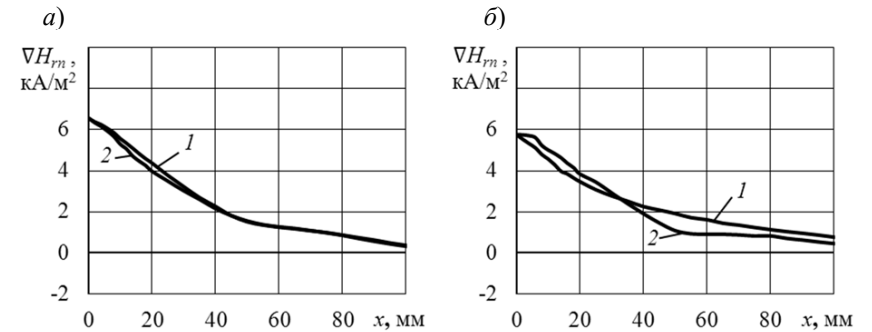


Рис. 1. Распределение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности вдоль (1) и поперек (2) направления прокатки по поверхности стальных листов с малым (а) и большим (б) значением коэффициента нормальной анизотропии R_n : а – $R_n = 1,918$, $R_0 = 1,958$, $R_{90} = 2,338$; б – $R_n = 2,054$, $R_0 = 2,073$, $R_{90} = 2,507$

Как видно из рис. 1, для образца с малым значением коэффициента нормальной анизотропии R_n кривые распределения величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренные вдоль и поперек направления прокатки, почти совпадают (см. рис. 1, а), а для образца с большим значением коэффициента нормальной анизотропии R_n на некотором расстоянии от центра

УДК 620.179.14

МЕХАНИЧЕСКАЯ И МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА СТАЛЕЙ**А. С. СЧАСТНЫЙ, В. А. БУРАК**Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

MECHANICAL AND MAGNETIC ANISOTROPY OF ROLLED STEELS**A. S. SCHASTNY, V. A. BURAK**

Аннотация. Были проведены исследования, подтверждающие наличие взаимосвязи между величинами, используемыми как мера механической анизотропии листового проката сталей, и магнитными параметрами остаточной намагниченности, измеренными вдоль и поперек направления прокатки. Показано, что относительная разница между величинами градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль и поперек направления прокатки, может быть с достаточной точностью использована для оценки механической анизотропии.

Ключевые слова: анизотропия, магнитные методы контроля, листовой прокат стали, остаточная намагниченность.

Abstract. Researching to confirm the correlation of the rolled steel mechanical anisotropy values and the magnetic residual magnetization parameters which are measured along and across the rolling direction were held. It is shown that the relative difference between the values of the normal component residual magnetization field strength gradients, measured along and across the rolling direction, can be used for evaluation of the mechanical anisotropy with necessary accuracy.

Key words: anisotropy, magnetic testing methods, rolled steel, residual magnetization

Изучение влияния неоднородности механических свойств, или анизотропии, листового проката сталей, влияющих на штампуемость, является важной и актуальной задачей магнитных методов неразрушающего контроля [1, 2]. За меру анизотропии механических свойств листовых металлов принят коэффициент анизотропии R [3, 4], представляющий собой отношение логарифмической деформации по ширине к логарифмической деформации по толщине образца на участке равномерной деформации при испытаниях на растяжение; наиболее часто используется коэффициент нормальной анизотропии R_n , представляющий собой сумму коэффициентов анизотропии, измеренных в направлениях 0, 45 и 90° относительно направления прокатки.

В [5] делается предположение, что по форме распределения напряженности поля остаточной намагниченности после импульсного намагничивания можно судить о наличии анизотропии, однако не приводятся данные о величинах, описывающих механическую анизотропию. Поэтому

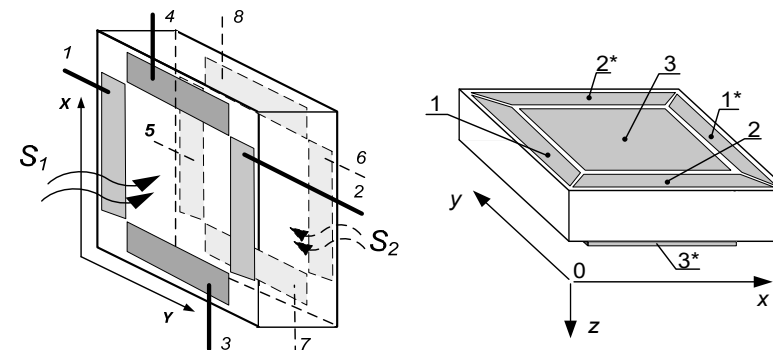


Рис. 2. Оптико-электронный компаратор (S_1 и S_2) и структура трёхкоординатного позиционно-чувствительного фотодетектора на базе одноэлементного ФЭП со встречно включенными барьерами Шоттки

Фотоприемники на основе полупроводниковых структур с многозарядной примесью из-за сложности и многоступенчатости процессов перезарядки зарядовых центров при изменении интенсивности освещения и длины волны оптического излучения обладают возможностью изменять поддиапазоны преобразования энергетической характеристики, спектральной характеристики чувствительности, быстродействия и др. под действием внешних и внутренних факторов, таких как смещение на дополнительных электродах, управляющее оптическое воздействие и т. д. [3]. Возможность изготавливать на одной сапфировой подложке и излучатель света, и фотоприемник позволяет изготавливать интегрированную структуру управляемого функционального ФЭП (рис. 3). Сапфировые подложки благодаря близости параметров кристаллической решетки используются для эпитаксии многих полупроводниковых материалов (Si, SiGe, GaN, AlGaN, тройных и четверных соединений типа A^3B^5 и др.) [4], что, в совокупности с выбором материала многозарядной примеси, обеспечивает формирование ФЭП в широком диапазоне требуемых спектральных и энергетических характеристик. Важными свойствами сапфировой подложки являются отличные диэлектрические характеристики, инертность, способность работы при высоких температурах, а отличные оптические свойства в ближнем и среднем ИК оптическом диапазоне позволяют вводить оптический измерительный сигнал как с лицевой стороны структуры (7, см. рис. 3), так и через подложку (7*).

Закономерности формирования сигнала ФЭП связаны с изменением эффективного времени жизни и подвижности с уровнем инжекции. На зависимости времени жизни носителей заряда от интенсивности оптического излучения существуют две области линейной рекомбинации,

разделенной областью нелинейной рекомбинации [3]. Следствием этого является формирование двух поддиапазонов энергетической характеристики с высокой степенью линейности (рис. 4).

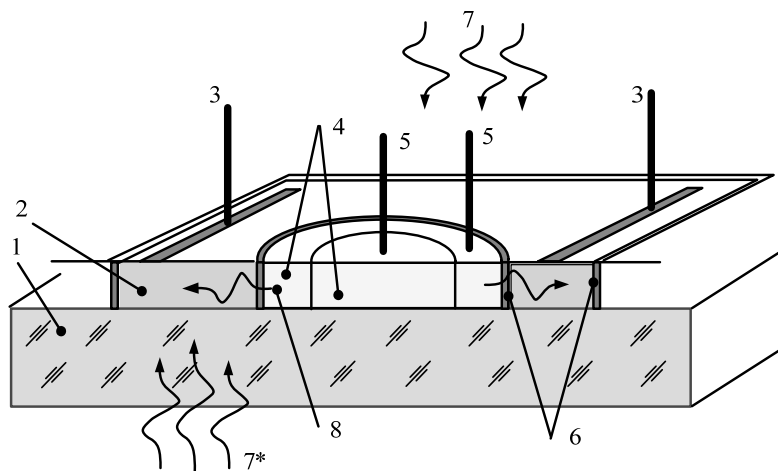


Рис. 3. Структура управляемого ФЭП на сапфировой подложке: 1 – сапфировая подложка; 2 – ФЭП на основе полупроводника с глубокой многозарядной примесью; 3 – выводы ФЭП; 4 – управляющий *p-n*-светодиод; 5 – выводы светодиода; 6 – слой изолирующего диэлектрика; 7 – входной оптический сигнал; 8 – управляющее излучение

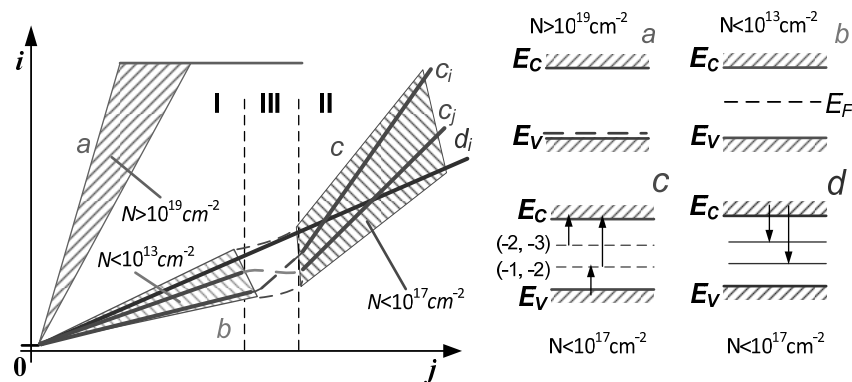


Рис. 4. Энергетические характеристики ФЭП с примесной проводимостью (а), собственной проводимостью (b), с многозарядными примесными центрами акцепторного (с) и донорного (d) типов и соответствующие энергетические диаграммы материалов этих ФЭП

5. Вишняков, Г. Н. Измерение разности фаз при линейном двулучепреломлении в дифференциальном фазовом поляриметре с вращающимся анализатором / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, А. Г. Ломакин // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 9. – С. 76–81.

6. Helen, S. S. Achromatic phase shifting by a rotating polarizer / S. S Helen M. P. Kothiyal, R. S. Sirohy // Optics Communications. – Vol. 154, № 5–6. – P. 249–254.

7. Yu Lung Lo. Full-field heterodyne polariscope with an image signal processing method for principal axis and retardation measurements / Yu Lung Lo // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 31. – P. 8006–8012.

8. Модуляционная поляриметрия термоупругости, индуцированной тепловым излучением в стекле / И. Е. Митяш [и др.] // ФТТ. – 2014. – Т. 56, вып. 7. – С. 1439–1445.

9. Джеррард, А. Введение в матричную оптику / А. Джеррард, Дж. М. Берч. – Москва: Мир, 1978. – 336 с.

10. Снопко, В. Н. Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения / В. Н. Снопко. – Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 124 с.

E-mail: avkh@bru.by.

$$I_1 = kI_0 J_1(2\delta_m) \cdot \sin(2\varphi - 2\varphi),$$

где $J_0(2\delta_m)$, $J_1(2\delta_m)$ – функция Бесселя нулевого и первого порядков от $2\delta_m$.

Так как величина сигнала пропорциональна $\ln 2\varphi$, то диапазон измерения углов φ ограничен пределами от -45° до $+45^\circ$. Для оценки чувствительности измерительной установки отметим, что для фотоприемника минимальная обнаруживаемая мощность излучения составляет [8, 10]

$$\delta W_{\min} = \left(\frac{4h\nu}{\gamma} BW \right)^{\frac{1}{2}},$$

где γ – квантовая эффективность фотодетектора; h – постоянная Планка; ν – оптическая частота; W – оптическая мощность; B – полоса частот.

Тогда при условии, что изменение интенсивности сигнала описывается выражением $I_1 = I_0 \cdot J_1(2\delta_m) \ln 2\Delta\varphi$, подавление сигнала происходит путем поворота анализатора до такого положения, когда сигнал на выходе равен нулю, а отсчет показаний осуществляется по углу поворота анализатора, можно получить при $W = 20 \cdot 10^{-6}$ Вт (соответствует предельной мощности облучения глаза человека), $B = 30$ Гц, $\gamma = 1$ и $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Гц, минимально обнаруживаемый поворот азимута поляризации $\Delta\varphi$ составляет величину $\Delta\varphi \sim 2 \cdot 10^{-6}$ рад.

Заключение. Представленная схема поляриметра позволяет работать со световыми пучками достаточно большого диаметра и обладает более высоким разрешением. При этом измерение угла поворота плоскости поляризации, вносимой оптически активным веществом, сводится к компенсации первой гармоники в спектре сигнала детектора, что позволяет автоматизировать процесс измерения, повысить чувствительность измеряемой установки, для которой минимальный регистрируемый угол поворота плоскости поляризации составил $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ рад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Азам, Н. Баша = ра. – Москва: Мир, 1981. – 583 с.
2. Панкова, Э. Д. Поляризационные угломеры / Э. Д. Панкова, В. В. Коротаев. – Москва: Недра, 1992. – 240 с.
3. Попечитеков, Е. П. Электрофизиологическая и фотометрическая медицинская техника / Е. П. Попечитеков, Н. А. Короневский. – Москва: Высшая школа, 2002. – 470 с.
4. Запаский, В. С. Методы высокочувствительных поляриметрических измерений / В. С. Запаский // ЖПС. – 1982. – Т. 37, вып. 2. – С. 181.

Для полупроводников с примесью акцепторного типа изменение постоянных времени жизни и рекомбинации достигает нескольких десятичных порядков, что обеспечивает соответствующее увеличение динамического диапазона преобразования ФЭП [3, 5]. Использование особенностей перезарядки многозарядных примесных глубоких центров позволяет создать ФЭП с переключаемым видом спектральной характеристики. Наличие центров с двумя и более глубокими уровнями в различных зарядовых состояниях (см. рис. 1) обеспечивает изменение максимума спектральной характеристики (рис. 5) при управлении зарядовым состоянием примесного центра [3]. При применении традиционных фотоприемников для оперативного управления видом спектральной характеристики понадобилось бы использование в одном измерительном преобразователе нескольких фотоприемников, каждый с оптическим фильтрующим элементом, настроенным на различные области спектра, светоделительное устройство и схема объединения электрических сигналов.

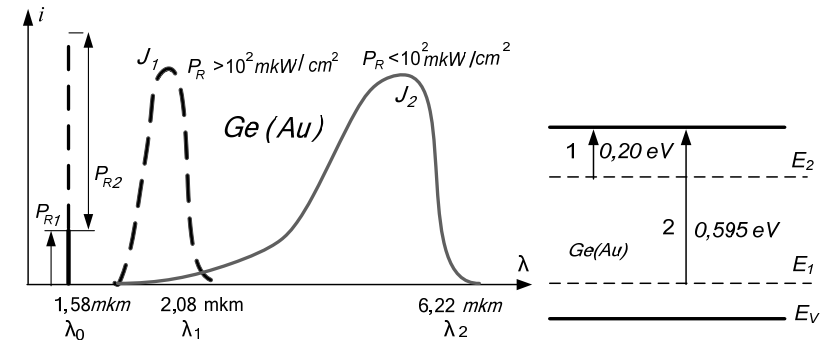


Рис. 5. Переключение спектральной характеристики фотоприемника с глубокой многозарядной примесью при дополнительной подсветке с длиной волны λ_0

Однако ФЭП на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью обеспечивают оперативное управление спектральной характеристикой чувствительности с использованием только одного элемента в широком диапазоне длин волн (рис. 6).

Многофункциональные одноэлементные фотоэлектрические преобразователи на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью позволяют реализовать в одном измерительном преобразователе определение нескольких параметров оптического излучения, например, длины волны и мощности оптического излучения, геометрических параметров изображения, сравнение характеристик изображения по нескольким параметрам одновременно в широком динамическом диапазоне изменения входных сигналов.

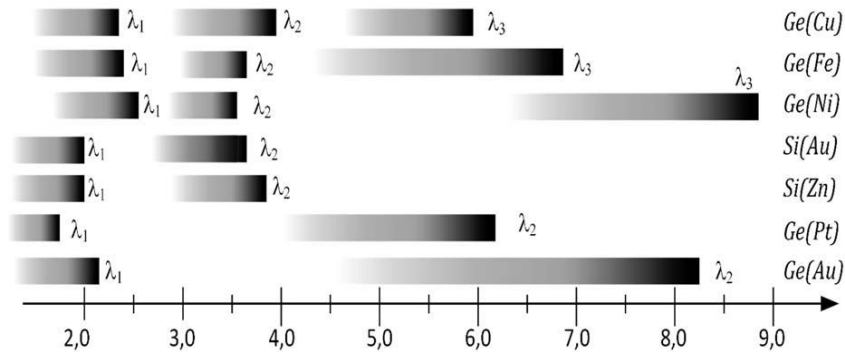


Рис. 6. Изменение «красной» границы чувствительности ФЭП под действием управляющих воздействий для разных материалов

Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники систем оптической диагностики для заданного диапазона плотностей мощности излучения, спектрального диапазона и функциональности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 53696–2009.** Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения / Нац. стандарт РФ.
2. Проектирование и управление метрологическими характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядными примесями / О. К. Гусев [и др.] // Датчики и системы. – 2011. – № 1. – С. 19–23.
3. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range / R. I. Vorobey [et al.] // Przegląd elektrotechniczny. – 2014. – № 5. – Р. 5–78.
4. Silicon on sapphire CMOS for optoelectronic microsystems / A. G. Andreou [et al.] // Circuits and Systems. – 2001. – Vol. 1. – Р. 22–30.
5. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей / О. К. Гусев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 2. – С. 34–42.

E-mail авторов: nil_pt@bntu.by.

Тогда интенсивность света, прошедшего через анализатор, определяется выражением

$$I = kI_0 \cos^2 \left(\delta_m \sin \omega t - \left(\varphi + \alpha - \frac{\varphi_0}{2} \right) \right),$$

где I_0 – интенсивность падающего света, k – коэффициент, учитывающий потери света на поглощение и рассеяние в элементах оптической схемы, расположенных до фотоприемника.

Интенсивность полей полутеневого устройства при $\alpha = 90^\circ$ и $\omega = 0$ одинакова и равна

$$I = kI_0 \sin^2(\varphi_0/2); \quad I = 0 \text{ при } \varphi = 0.$$

Предположим, что в результате погрешности выравнивания освещенности полей, ошибки установки анализатора равны $\Delta\alpha$, тогда интенсивность полей

$$I_1 = kI_0 \sin^2(\varphi_0/2 + \Delta\alpha); \quad I_2 = kI_0 \sin^2(\varphi_0/2 - \Delta\alpha),$$

а их разность

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 2kI_0 \cdot \sin(\varphi_0/2) \cos(\varphi_0/2) \ln 2\Delta\alpha; \quad \frac{\Delta I}{I} = 2 \operatorname{ctg}(\varphi_0/2) \ln 2\Delta\alpha.$$

Результаты и их обсуждение. Интенсивность светового потока пропорциональна яркости, поэтому левую часть последнего равенства можем рассматривать как отношение разности освещенности полей к величине яркости, что соответствует порогу чувствительности фотоприемника. Последнее равенство определяет полутеневой угол φ_0 при заданной величине $\Delta\alpha$ погрешности ориентации анализатора. Так, для малых углов $\Delta\alpha$ и φ_0 и пороге контрастности 2 % будем иметь: при $\varphi_0 = 1^\circ$ погрешность $\Delta\alpha = 0,0025^\circ$, при $\varphi_0 = 2^\circ$ и $\varphi_0 = 8^\circ$ величина $\Delta\alpha$ составляет 0,005 и $0,02^\circ$ соответственно.

В случае вращения полуволновой пластинки при скрещенных поляризаторе и анализаторе ($\alpha = 90^\circ$) на входе фотоприемника регистрируется минимальная постоянная составляющая сигнала [2]

$$I = 0,5kI_0 [1 - J_0(2\delta_m) \cos 2\varphi] + T_1,$$

где T_1 – пропускание скрещенных поляризатора и анализатора.

При этом амплитуда первой гармоники сигнала максимальна:

поляризации, рассмотрена в [8], где показано, что сигнал фотодетектора, оперируемый эллиптическим поляризованным в общем случае излучением, содержит линейную и циркуляционную составляющие, которые формируют переменные сигналы фотодетектора на частоте модулятора и удвоенной частоте соответственно.

Анализ поляризации света на основе формализма матриц Джонса.

При описании интенсивности света, прошедшего через оптическую схему, учтем, что поляризатор и анализатор ориентированы под углом 0° и α относительно оси ОХ. Матрица оптически активной среды представляет собой матрицу поворота и без учета поглощения излучения имеет вид [9]:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Влияние вращающей полуволновой пластинки опишем матрицей Джонса:

$$\begin{pmatrix} \cos\left(\delta_m \cdot \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) - \sin\left(\delta_m \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \\ \sin\left(\delta_m \cdot \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos\left(\delta_m \sin \omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \end{pmatrix},$$

где δ_m – амплитуда модуляции азимута поляризованного света, вносимая $\lambda/2$ -пластинкой; ω – круговая частота модуляции светового потока; $\varphi/2$ – начальная фаза, вносимая $\lambda/2$ -пластинкой.

Вектор Максвелла для пучка зондирующего излучения на выходе из системы определим с помощью выражения [9]

$$E = J_A \cdot J_0 \cdot J_m \cdot J_p E_0,$$

где E_0 – вектор Максвелла для исходного состояния поляризации зондирующего излучения; J_0, J_m, J_A – матрицы Джонса, моделирующие оптически активное вещество, полуволновую пластинку и анализатор соответственно. После соответствующей подстановки и преобразований вектор Максвелла будет иметь вид:

$$E = \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \delta_m) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_0}{2} - \varphi\right) \\ \cos(\alpha + \delta_m) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) - \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}.$$

УДК 53.093

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕЛЕГРАФНЫХ УРАВНЕНИЙ

Н. В. ГЕРАСИМЕНКО, С. В. БОЛОТОВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 53.093

MATHEMATICAL MODELING OF OPERATIONAL REMOTE CONTROL SYSTEM BASED ON TELEGRAPH EQUATIONS *N. V. HERASIMENKO, S. V. BOLOTOV*

Аннотация. На основе телеграфных уравнений разработана математическая модель системы оперативного дистанционного контроля труб в режиме рефлектометрии. Моделирование выполнено численно с применением метода конечных разностей во временной области и алгоритма Йи.

Ключевые слова: модель, уравнение, контроль, система, мониторинг.

Abstract. Mathematical model of the pipes remote control and monitoring in the time-domain reflectometry mode has been developed. The simulation is done numerically by using the finite difference time domain method and the Yee algorithm.

Key words: model, equation, control, system, monitoring.

Линия системы оперативного дистанционного контроля (СОДК) представляет собой систему из двух проводников, включающую сигнальный проводник и участок поверхности металлической трубы. Такая линия обладает сопротивлением, эквивалентным сопротивлению проводника на единицу длины, индуктивностью проводника на единицу длины, а также емкостью и проводимостью утечки между проводниками на единицу длины. В классической теории электрических цепей с распределенными параметрами такие параметры принято называть первичными и обозначать R_x , L_x , C_x , G_x соответственно, $i(x,t)$, $u(x,t)$ – ток и напряжение, представленные как функции времени и координаты.

Рассмотрим модель, изображенную на рис. 1.

Как следует из рис. 1, элемент длины линии системы (рис. 2) оперативного дистанционного контроля представляет собой электрическую цепь – четырехполюсник, обладающий первичными параметрами линии. Первичные параметры определяются путем эксперимента.

Получим уравнения состояния рассматриваемой линии. Поместим элементарный участок линии внутрь замкнутой поверхности. Тогда согласно принципу непрерывности тока суммарный ток сквозь замкнутую поверхность равен нулю, что позволяет записать следующее:

$$-i(x,t) + i(x,t) + \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} dx + G_x dx \cdot u(x,t) + C_x dx \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

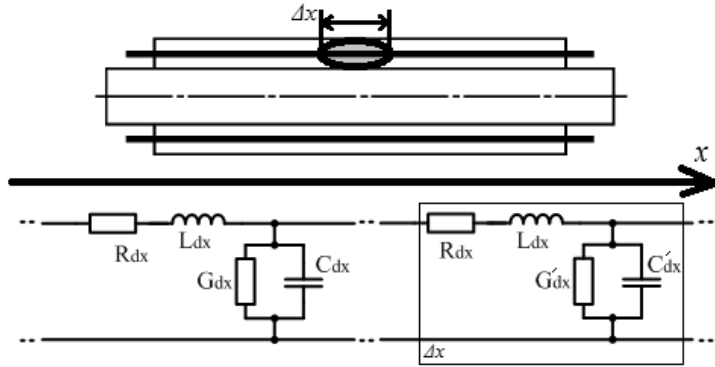


Рис. 1. Линия системы контроля и ее математическая модель

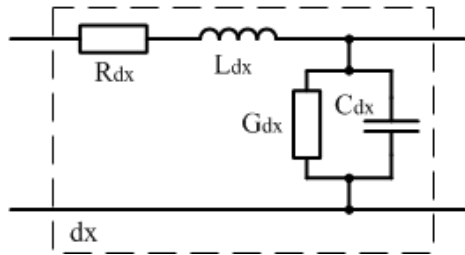


Рис. 2. Элементарный участок линии

Откуда имеем уравнение, описывающее изменение тока в линии:

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Gu(x,t) + C \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}. \quad (2)$$

Наличие емкости между проводниками и проводимости утечки приводит к тому, что напряжение на входе элементарного участка и на его выходе отличается. Применяя контурное уравнение, получаем

$$-u(x,t) + u(x,t) + \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} dx + R_x dx \cdot i(x,t) + L_x dx \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

анализатором. Присутствие деполаризации ограничивает чувствительность классических поляризационно-оптических методов, увеличивает погрешность установки анализатора при равенстве полей полутеневого устройства. В случае же модуляции поляризации излучения происходит периодическое изменение ее состояния при неизменной интенсивности излучения. В результате регистрируется переменная составляющая на выходе фотоприемника, связанная с изменением углов поворота плоскости поляризации зондирующего излучения, которую можно селективно усилить. Принципиальная схема установки, используемой для измерений, приведена на рис. 1.

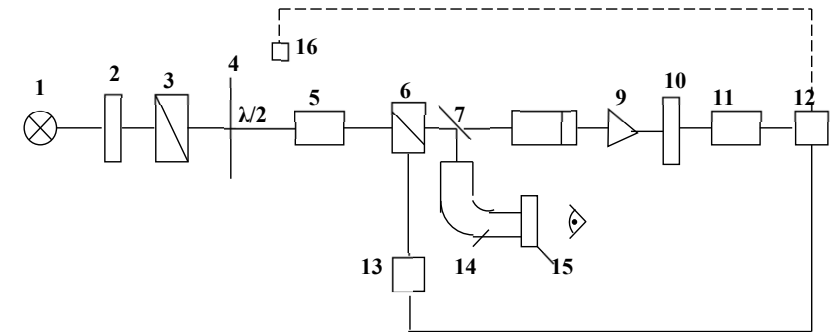


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник; 2 – светофильтр; 3 – поляризатор; 4 – полуволновая пластинка; 5 – образец; 7 – делительная пластина; 8 – световод с фотоприемниками; 9 – селективный усилитель; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – интерфейс компьютера; 13, 16 – шаговые двигатели; 14 – световод; 15 – окуляр

В качестве источника света использована лампа накаливания с фильтром на длину волны 590 нм. Полуволновая пластинка перекрывает среднюю часть лучей, выходящих из поляризатора, при этом ее главное направление составляет с направлением пропускания поляризатора угол $\varphi/2$, как уже отмечалось $\lambda/2$ -пластинка поворачивает плоскость поляризации проходящего через нее линейного поляризованного света на угол φ . Анализатор устанавливается на равное минимальное освещение полей при отсутствии вращающего вещества, а затем при его наличии. При этом плоскость колебаний светового вектора в пучках, освещающих обе половины поля зрения, повернется на угол φ , на этот же угол повернется и анализатор. Модулятор поляризации представляет собой вращающуюся пластинку полуволны, установленную за поляризатором в направлении распространения света. В результате вращения модулятора вокруг экваториальной плоскости со скоростью $\dot{\omega}$ возникает вращающаяся фигура. Работа модулятора в роли элемента, управляющего состоянием

широкой области спектра вызывает затруднения, т. к. большинство компенсаторов работают лишь в узкой спектральной области, либо даже на одной фиксированной длине волны. Поэтому в настоящее время при измерении угла поворота плоскости поляризации широко применяются полутеневые устройства [4]. Существуют различные типы таких устройств, в некоторых из них после поляризатора по ходу распространения излучения устанавливается поляризационная призма, частично перекрывающая световой пучок. Плоскость колебаний выходящего излучения из призмы составляет некоторый полутеневой угол с плоскостью колебаний, выходящих из поляризатора. В качестве полутеневой пластинки часто используют полуволновую пластинку. Главное направление $\lambda/2$ -пластинки составляет с направлением пропускания поляризатора малый угол (несколько градусов), который обозначим как $\varphi/2$. Пластинка $\lambda/2$ поворачивает плоскость колебаний проходящего через него линейно поляризованного света на угол φ . Таким образом, направление колебаний линейно поляризованного света после $\lambda/2$ -пластинки составляет угол φ с плоскостью колебаний линейно поляризованного света, проходящего мимо пластинки. Угол вращения оптически активного вещества равен разности отсчетов, полученных при уравнивании полей полутеневого устройства с испытанным образцом и без него с точностью до $0,01^\circ$ при визуальном контроле. Погрешность ориентации анализатора в этих устройствах в основном определяется порогом чувствительности глаза, который определяется отношением наименьшей, но еще различимой, разности яркости двух полей к величине самой яркости. Порог чувствительности глаза зависит от яркости и угловых размеров полей сравнения, рассеяния света, его индивидуальных свойств и др. Указанных недостатков лишена модуляционная поляриметрия [8]. При этом техника регистрации изменения интенсивности поляризованного света, прошедшего через образец, упрощается: не требуется опорный пучок, к источнику и приемнику не предъявляются особые требования, весь оптический тракт менее сложен, хотя в измерительную установку и вводится модулятор поляризации зондирующего излучения.

В работе рассмотрены особенности применения поляризационной модуляции в поляриметрии при измерении концентрации оптически активных веществ.

Методика эксперимента. Введение дополнительной модуляции поляризации зондирующего излучения в оптическую схему поляриметра, состоящего из скрещенных анализатора и поляризатора, обусловлена присутствием в схеме деполаризованного (или эллиптически поляризованного света). Деполаризованный свет возникает в результате рассеивания при распространении света через испытуемый образец и оптические детали поляриметра, сторонней засветки, а также при двойном лучепреломлении в образце и оптических деталях, расположенными между поляризатором и

Из (3) вытекает уравнение, описывающее изменение напряжения между проводниками линии:

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}. \quad (4)$$

Система уравнений (2), (4) представляет собой известные телеграфные уравнения, описывающие распространение электромагнитной волны вдоль проводов. Аналитическое решение такой системы, особенно в случае постоянных параметров R, L, C, G , не представляет трудностей. Полученное дифференцированием и подстановкой волновое уравнение может быть решено путем интегрирования вдоль характеристик или же методом разделения переменных. Тем не менее специфика поставленной здесь задачи предполагает исследование распространения сигналов различной формы и длительности в линии системы оперативного дистанционного контроля. В такой постановке задачи наилучшей гибкостью и наглядностью обладает численный метод, по этой причине далее будет рассмотрено численное решение системы уравнений (2), (4).

Следует отметить, что методы численного решения задач, связанных с распространением волн, сами по себе представляют большой интерес, особенно в вопросах оптимизации вычислительных алгоритмов. Некоторые результаты исследований в области численных алгоритмов решения волновых уравнений нашли отражение в [1].

Уравнения (2), (4), очевидно, являются частным случаем, вытекающим из системы уравнений Максвелла. Отсюда можно заключить, что все известные методы и численные алгоритмы, предназначенные для решения задач, связанных с распространением электромагнитных волн, в данном случае также применимы. Одним из наиболее популярных и мощных методов решения уравнений электродинамики является метод конечных разностей во временной области (FDTD), базирующийся на алгоритме Кейна Йи.

Сущность численного алгоритма Йи заключается в построении дискретных сеток для электрического и магнитного полей, обладающих пространственным смещением друг относительно друга [2]. При заданных начальных условиях алгоритм Йи дает эволюционное решение во времени от начала отсчета с заданным временным шагом.

Адаптируем метод FDTD для решения системы уравнений (2), (4). Очевидно, такая система требует две сетки: для волн напряжения и тока соответственно. Следуя алгоритму Йи, эти сетки могут быть смещены в пространстве. Численное решение будет представлять собой пространственную и временную эволюцию волн напряжения и тока путем «перескока», что в точности отражает идею телеграфных уравнений. На рис. 3 изображен

шаблон численного алгоритма. Точками изображены пространственные узлы тока, крестиками – напряжения.

Анализ устойчивости численного алгоритма выполняется согласно критерию Куранта–Фридрихса–Леви, который формулируется для телеграфных уравнений аналогично волновым [3].

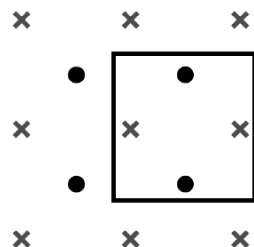


Рис. 3. Шаблон сетки: • – узел напряжения; x – узел тока

На рис. 4 представлен результат моделирования рефлектограммы линии, имеющей повреждение. На рис. 4, а изображен исходный зондирующий импульс, на рис. 4, б – отраженный сигнал.

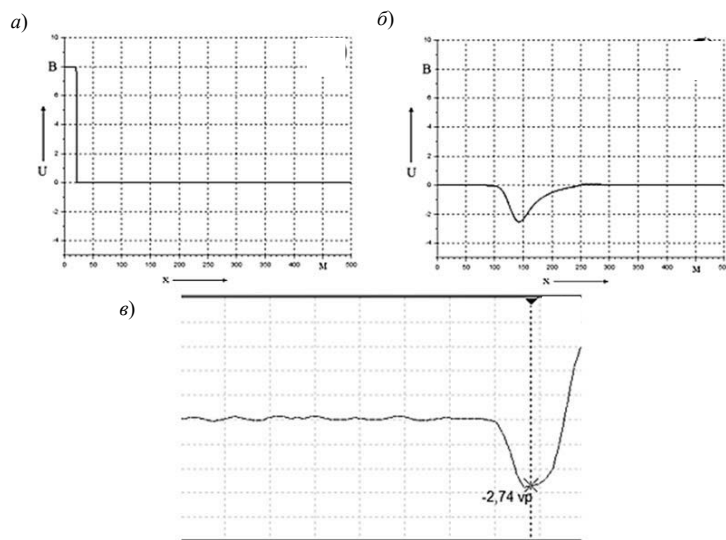


Рис. 4. Модель рефлектограммы трубопровода с дефектом: а – зондирующий импульс; б – отраженный импульс; в – рефлектограмма РЕИС

УДК 535.5 + 621.658.011:620.1

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

А. Г. СТАРОВОЙТОВ, А. В. ХОМЧЕНКО

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 535.5 + 621.658.011:620.1

FEATURES OF APPLICATION OF POLARIZATION MODULATION IN CONTROL OF THE OPTICAL ACTIVITY OF MATERIALS

A. G. STAROVOYTOV, A. V. KHOMCHENKO

Аннотация. Рассмотрены особенности применения поляризационной модуляции при измерении угла поворота плоскости поляризации зондирующего излучения оптически активным веществом. Выполнен анализ поляризации света на основе формализма матриц Джонса. Получена оценка чувствительности метода при исследовании свойств оптически активных материалов.

Ключевые слова: поляризационная модуляция, оптическая активность, полутеневая пластинка.

Abstract. The features of using polarization modulation when measuring the angle of rotation of the plane of polarization of the incident light by an optically active material are considered. The analysis of light polarization is carried out on the basis of the Jones matrix formalism. An estimate of the sensitivity of the method is obtained when studying the properties of optically active materials.

Key words: polarization modulation, optical activity, half-wave plate.

Введение. Наличие оптической активности ряда кристаллов (например, кварца, киновари) и жидкостей (скипидара, раствора сахара в воде) контролируется методом оптической поляриметрии [1–4]. Измерение интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец и «скрещенные» поляризаторы, позволяет оценить угол поворота плоскости поляризации падающего света и определить концентрацию оптически активного вещества [3, 4]. В методах измерения углов вращения плоскости поляризации оптически активным веществом, получивших название нулевых методов гашения [1, 2], величина азимутального угла определяется с помощью различного вида компенсаторов [5–7]. При этом азимутальный угол компенсатора измеряется при условии, когда интенсивность падающего на приемник светового потока равна нулю или минимальна. Существенным преимуществом такой схемы измерения является полная независимость измеряемых параметров поляризации от изменений мощности источника оптического излучения и чувствительности приемника, а следовательно, такой способ измерения является более точным и достоверным. Однако проведение измерений такими методами в

Разработанный метод обработки спектров отражательной способности неоднородного поглощающего слоя, основанный на модели Лорентц-Лоренца, позволяет определить геометрические и оптические характеристики золь-гель-слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ и термически окисленного слоя SiO_2 .

Работа выполнена в рамках задания ГПНИ «Фотоника, опто- и микро-электроника», НГР 20161316 и ГПНИ РБ, НГР 20200132.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модель Лорентц-Лоренца в обратной задаче спектрофотометрии неоднородного слоя / А. Б. Сотский [и др.] // ЖПС. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 809–817.
2. Характеристики пленок титаната бария / Н. И. Стаськов [и др.] // Проблемы взаимодействия излучения с веществом: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. – Гомель: ГГУ, 2018. – Т. 2. – С. 223–227.

Разработанная численная модель позволяет анализировать однородные и неоднородные электрические линии любого типа, включая нелинейные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численное моделирование одномерной нестационарной нелинейной параметрической неустойчивости / Ф. М. Трухачев [и др.] // VI Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр. – Минск, 2017. – С. 284–285.
2. **Yee, K.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / K. Yee // Antennas and Propagation, IEEE Transactions on. 14. – 1966. – P. 302–307.
3. **Tranah, D.** Numerical solution of partial differential equations / D. Tranah. – Cambridge University Press, 1994.

E-mail: s.v.bolotov@mail.ru; gerasimenko_nikita@hotmail.com.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 08Г2Б ПРИ УПРУГОМ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Э. С. ГОРКУНОВ, А. М. ПОВОЛОЦКАЯ, С. М. ЗАДВОРКИН,
Е. А. ПУТИЛОВА, А. Н. МУШНИКОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиностроения Уральского отделения Российской академии наук
Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

EFFECT OF PRELIMINARY CYCLIC LOADING ON MAGNETIC BEHAVIOUR OF 08G2B HOT-ROLLED STEEL UNDER ELASTIC UNIAXIAL TENSION

E. S. GORKUNOV, A. M. POVOLOTSKAYA, S. M. ZADVORKIN,
E. A. PUTILOVA, A. N. MUSHNIKOV

Аннотация. В работе представлены результаты изучения влияния предварительного циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения на различное количество циклов на поведение магнитных характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при последующем упругом одноосном растяжении. Предыстория в виде циклического нагружения сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материала при последующем упругом деформировании вследствие остаточных сжимающих напряжений, формируемых предварительным циклическим нагружением вдоль оси нагружения. Установлены диапазоны приложенных растягивающих напряжений, в которых магнитные характеристики, измеренные на образцах, подвергнутых предварительному циклическому растяжению на различное количество циклов, изменяются однозначно.

Ключевые слова: циклическое нагружение, упругое одноосное растяжение, магнитоstriction.

Abstract. The paper presents on the results of studying the effect of preliminary zero-tension cycling with different number of cycles on the magnetic parameters of the 08G2B hot-rolled steel under subsequent elastic tension. The cyclic loading prehistory affects the magnetic behavior of the material during its subsequent elastic deformation since preliminary cycling induces various compressive residual stresses along the direction of loading. The ranges of applied tensile stresses has been determined where the magnetic characteristics measured on specimens cyclically pre-deformed with different number of cycles vary uniquely.

Key words: cyclic loading, elastic uniaxial tension, magnetostriction.

Разработка методов контроля упругих деформаций, возникающих в процессе эксплуатации изделий из ферромагнитных конструкционных материалов, является актуальной задачей. В большинстве работ, посвященных решению данной задачи, не принимается во внимание предыстория

градиентный слой, в котором европий вступает в соединение с титаном бария.

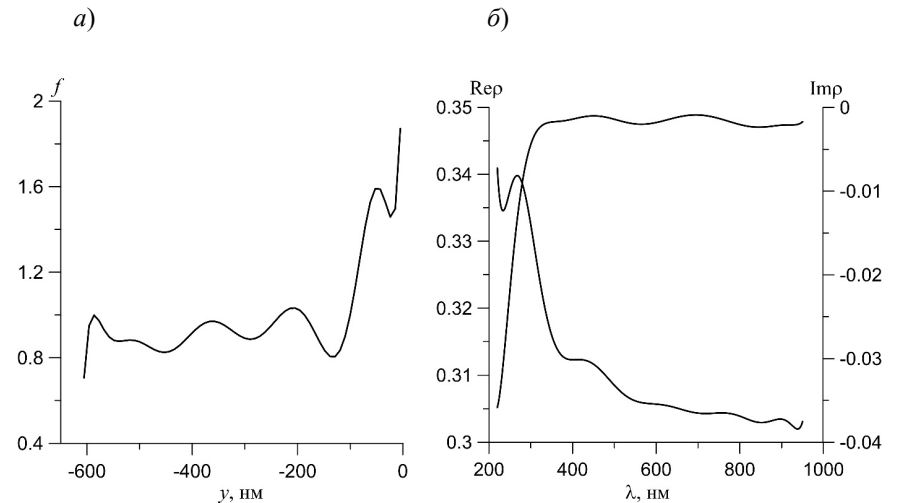


Рис. 3. Восстановленные функция плотности (а) и коэффициент рефракции (б) слоя BaTiO₃:Eu

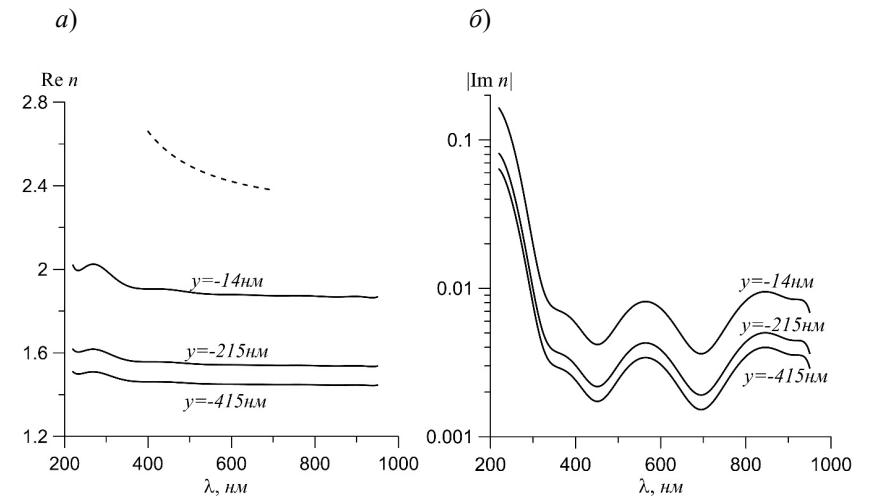


Рис. 4. Сплошные кривые – восстановленные спектры вещественной (а) и мнимой (б) частей показателя преломления слоя BaTiO₃:Eu при указанных γ . Штриховая кривая – известный из литературы спектр показателя преломления кристалла BaTiO₃

На снимке видно, что слой $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ состоит из плотной поверхностной пленки, толщиной около 76 нм и более рыхлого подслоя толщиной около 559 нм.

Исследование оптических свойств слоя выполнено на спектрофотометре Photon RT (ЭссентОптикс, Беларусь). Измерены спектры R_k для s - и p -волн в области от 200 до 950 нм с шагом 2 нм при $\theta = 10, 30, 50, 70^\circ$ ($K = 2952$). Некоторые из них представлены на рис. 2, который позволяет также судить о соответствии теории и эксперимента.

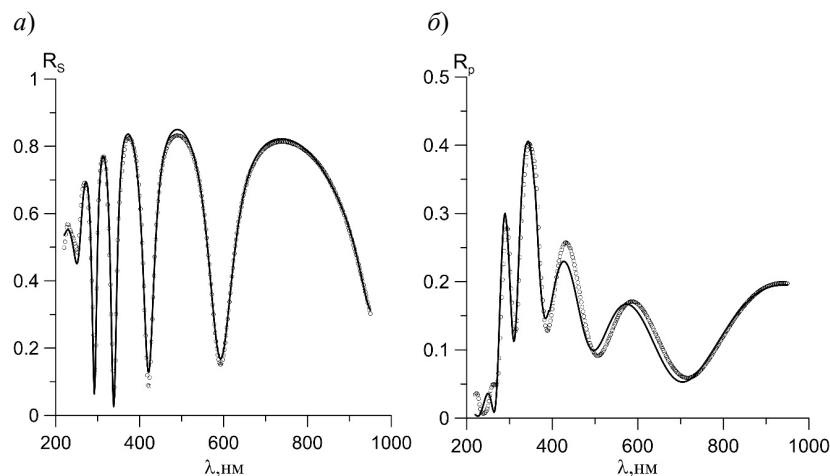


Рис. 2. Отражательные способности слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ для s -волн (а) и p -волн (б) при $\theta = 70^\circ$. Дискретные точки – эксперимент, кривые – теория

Дисперсионные свойства материала слоя иллюстрирует рис. 3. Он соответствует диапазону $d \leq y \leq 0$, где найденное значение $d = p_1 = 610$ нм.

Функция $f(y)$ на рис. 3, а согласуется с данными рис. 1. Низкая плотность слоя в области $y < 100$ нм свидетельствует о наличии в нем пустот.

Рис. 4 иллюстрирует дисперсию комплексного показателя преломления исследованного слоя. Согласно приведенным данным, дисперсия объемного кристаллического BaTiO_3 существенно отличается от дисперсии материала слоя.

Но, согласно [2], показатель преломления слоя при $y = -14$ нм близок к показателю преломления золь-гель-пленки BaTiO_3 , не допированной европием. Отсюда следует, что на поверхности кремния образуется

материала, в то время как текущее состояние металлоконструкций, как правило, существенно отличается от заложенного в проектной документации и при выпуске с завода-производителя. В [1, 2] показано, что предварительная пластическая деформация статическим растяжением образцов из конструкционной стали значительно влияет на поведение их магнитных характеристик при последующем упругом деформировании. С учетом того, что в течение своего жизненного цикла изделия подвергаются чаще всего циклическим нагрузкам, представляет интерес исследование, аналогичное проведенным в [1, 2], но в котором предварительное деформирование осуществляется циклическим нагружением.

В настоящей работе изучено влияние предварительного отнулевого циклического растяжения на различное количество циклов конструкционной стали 08Г2Б на поведение ряда ее магнитных характеристик в условиях последующего статического упругого одноосного растяжения.

Объектом исследования служили плоские образцы с головками, циклически испытанные на различное количество циклов n : 0, 30 тыс., 50 тыс., 100 тыс. и 300 тыс. циклов по схеме отнулевого растяжения с амплитудой 300 МПа, немного превышающей значение условного предела текучести. Циклически деформированные образцы подвергали упругому одноосному растяжению с одновременным измерением их магнитных характеристик. Измерения проводили как в замкнутой магнитной цепи, так и с использованием накладных преобразователей.

На рис. 1 показаны зависимости полученных в условиях замкнутой магнитной цепи магнитных характеристик образцов от приложенных напряжений σ при упругом растяжении после их предварительного циклического нагружения на различное количество циклов. Можно отметить, что при растяжении с ростом n характер изменения магнитных характеристик для образцов с различным исходным напряженно-деформированным состоянием сохраняется: с увеличением σ коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\max}$ изменяются с образованием экстремумов. При этом с ростом n экстремумы смещаются в область больших напряжений. Это свидетельствует об усилении остаточных напряжений сжатия с ростом количества циклов предварительного циклического нагружения, поскольку экстремумы $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ наблюдаются при тех величинах напряжений, при которых в наибольшей степени происходит компенсация внутренних сжимающих напряжений внешними растягивающими.

На рис. 2 (I, II) представлены зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы ($H_{c3}^{\parallel}$ и $H_{c3}^{\perp}$) и среднеквадратичных значений напряжения магнитных шумов Баркгаузена ($U^{\parallel}$ и $U^{\perp}$), измеренных с помощью приставных магнитных устройств (ПМУ) вдоль и поперек направления приложения нагрузки, при упругом деформировании образцов, предварительно нагруженных на разное

количество циклов. Из сравнения рис. 1 и 2 можно видеть качественное подобие зависимостей $H_c(\sigma)$ и $H_{c3}^{\parallel}(\sigma)$.

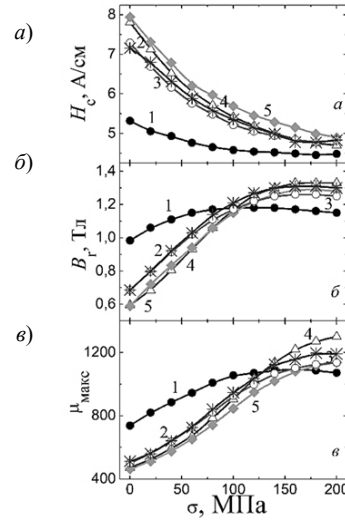


Рис. 1. Зависимости $H_c(\sigma)$ (а), $B_T(\sigma)$ (б) и $B_{max}(\sigma)$ (в), измеренные в замкнутой магнитной цепи на образцах, циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (•) – $n = 0$; 2 (*) – 30; 3 (○) – 50; 4 (Δ) – 100; 5 (◆) – 300 тыс. циклов

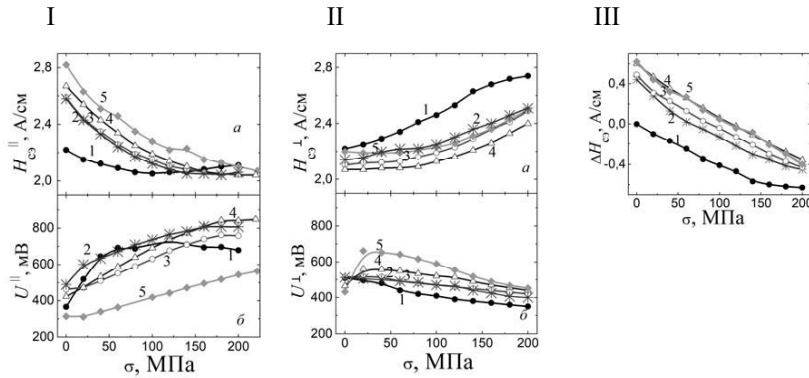


Рис. 2. Зависимости $H_{c3}^{\parallel}(\sigma)$ (Ia), $H_{c3}^{\perp}(\sigma)$ (IIa), $U^{\parallel}(\sigma)$ (Iб), $U^{\perp}(\sigma)$ (IIб) и $\Delta H_{c3}(\sigma)$ (III). Измерения проведены с помощью ПМУ на образцах, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (•) – $n = 0$; 2 (*) – 30; 3 (○) – 50; 4 (Δ) – 100; 5 (◆) – 300 тыс. циклов. (I) – измерения вдоль оси нагружения; (II) – поперек

$$I(p_1, \dots, p_l) = \sum_{k=1}^K \left(R_k - |r_k(p_1, \dots, p_l)|^2 \right)^2, \quad (4)$$

$2LL + LY + 1$ вещественных переменных $p_1, \dots, p_l$. Здесь $l = 2LL + LY + 1 \ll K$; $p_1 = d$; $p_j = \text{Re} \rho_{j-1}$ при $j = 2, \dots, LL + 1$; $p_j = \text{Im} \rho_{j-LL-1}$; $j = LL + 2, \dots, 2LL + 2$; $p_j = f_{j-2LL-1}$; $j = 2LL + 2, \dots, l$; R_k – эксперимент. Для отыскания минимума функции (4) использована итерационная схема [1]

$$p_j^{(k+1)} = p_j^{(k)} + \sum_{i=1}^l (Q^{-1})_{ji} (B)_i,$$

$$(Q)_{ij} = \sum_{k=1}^K \text{Re} \left(r_k^* \frac{\partial r_k}{\partial p_i} \right) \text{Re} \left(r_k^* \frac{\partial r_k}{\partial p_j} \right), \quad (B)_i = 0,5 \sum_{k=1}^K (R_k - |r_k|^2) \text{Re} \left(r_k^* \frac{\partial r_k}{\partial p_i} \right),$$

где k – номер итерации, матрица Q и вектор B соответствуют $p_j = p_j^{(k)}$.

Для получения слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ использовали золь, в котором концентрации титаната бария (BaTiO_3) и оксида европия (Eu_2O_3) составляли соответственно 56,6 и 2,209 мг/мл. Слой наносился на термически окисленную кремниевую подложку, которая предварительно очищалась хромпиком и промывалась дистиллированной водой. Золь наносили центрифугированием при 1600 об/мин в течение 30 с. Затем образец сушился при температуре 150 °C в течение 10 мин и отжигался при температуре 450 °C в течение 30 мин.

О морфологии полученного слоя позволяет судить снимок его скола, полученный на электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi S-4800 (рис. 1).

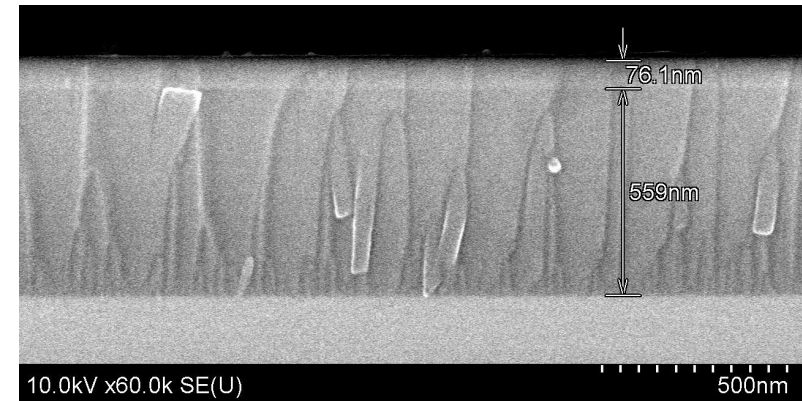


Рис. 1. РЭМ-снимок слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ на кремниевой подложке

где $k_y = k_0 \sqrt{\varepsilon_a - \beta^2}$; $\varepsilon_a = n_a^2$; $k_0 = 2\pi\lambda^{-1}$; $\beta = n_a \sin \theta$; n_a – показатель преломления воздуха, ψ_{m+1} , ψ'_{m+1} рассчитываются по рекуррентным формулам

$$\begin{aligned}\psi_{j+1} &= \psi_j \cos(\sigma_j \Delta y) + \psi'_j \sin(\sigma_j \Delta y) \sigma_j^{-1}; \\ \psi'_{j+1} &= -\psi_j \sigma_j \sin(\sigma_j \Delta y) + \psi'_j \cos(\sigma_j \Delta y),\end{aligned}\quad (1)$$

где $\psi_1 = 1$; $\psi'_1 = i\sigma_s$; $\sigma_j = k_0 \sqrt{\varepsilon_j - \beta^2}$; $\sigma_s = k_0 \sqrt{\varepsilon_s - \beta^2}$; $\varepsilon_s = n_s^2$.

Для волн p поляризации $\psi_1 = 1$, $\psi'_1 = i\sigma_s \varepsilon_s^{-1}$,

$$\begin{aligned}r_k &= (ik_y \psi_{m+1} - n_a^2 \psi'_{m+1})(ik_y \psi_{m+1} + n_a^2 \psi'_{m+1})^{-1}; \\ \psi_{j+1} &= \psi_j \cos(\sigma_j \Delta y) + \psi'_j \varepsilon_j \sin(\sigma_j \Delta y) \sigma_j^{-1}; \\ \psi'_{j+1} &= -\psi_j \sigma_j \varepsilon_j^{-1} \sin(\sigma_j \Delta y) + \psi'_j \cos(\sigma_j \Delta y).\end{aligned}\quad (2)$$

Модель Лорентц-Лоренца подразумевает задание комплексной диэлектрической проницаемости неоднородного слоя в виде

$$\varepsilon(\lambda, y) = [1 + 2\rho(\lambda)f(\eta)][1 - \rho(\lambda)f(\eta)]^{-1}, \quad (3)$$

где $\eta = yd^{-1}$; d – толщина слоя; $\rho(\lambda)$ и $f(\eta)$ – комплексный коэффициент рефракции и вещественная функция плотности материала слоя. Функции $\rho(\lambda)$ и $f(\eta)$ ищем в форме полиномов

$$\rho(\lambda) = \sum_{j=1}^{LL} \rho_j PL(j, \lambda); \quad f(\eta) = 1 + \sum_{j=1}^{LY} f_j PY(j, \eta),$$

где $PL(j, \lambda) = [(\lambda - \bar{\lambda})(B - \bar{\lambda})^{-1}]^{j-1}$; $PY(j, \eta) = \eta^j + (-1)^{j+1}(j+1)^{-1}$; $\bar{\lambda} = 0,5(A+B)$; A и B – границы спектрального диапазона; $LL-1$ и LY – порядки полиномов; d , ρ_j , f_j – параметры, подлежащие определению. Они находятся методом наименьших квадратов с целевой функцией

С ростом растягивающих напряжений значения $H_{cs}^\perp$, измеренные в поперечном направлении, для образцов, предварительно циклически нагруженных на 0, 30 тыс. и 50 тыс. циклов, монотонно увеличиваются, в то время как для образцов, циклически нагруженных на 100 тыс. и 300 тыс. циклов, значения коэрцитивной силы изменяются неоднозначно с формированием минимума. Особенности поведения зависимостей $H_{cs}^\perp(\sigma)$ обусловлены тем, что после проведенного циклического нагружения в образце в перпендикулярных оси растяжения направлениях возникают остаточные напряжения растяжения, причем чем на большее количество циклов был образец нагружен, тем больше они по абсолютной величине. При последующем упругом растяжении такого образца на него при измерениях в поперечном направлении будут оказывать суммарное действие внешние сжимающие напряжения и остаточные растягивающие напряжения. В случае, когда уровень остаточных растягивающих напряжений относительно низкий, внешние сжимающие напряжения приводят к монотонному увеличению значений коэрцитивной силы, а в случае соизмеримости уровня остаточных напряжений с внешними приложенными – к образованию минимума, который формируется при наибольшей степени компенсации внутренних напряжений внешними. Среднеквадратичные значения напряжений шумов Баркгаузена имеют противоположный характер изменения с ростом растягивающих напряжений по сравнению с коэрцитивной силой.

Разность значений коэрцитивной силы, измеренных в продольном и поперечном направлениях, $\Delta H_{cs}(\sigma)$, где $\Delta H_{cs} = H_{cs}^\parallel - H_{cs}^\perp$, как видно из рис. 3 (III), с ростом растягивающих напряжений изменяется однозначно во всем интервале приложенных напряжений для всех образцов, циклически нагруженных на разное количество циклов. Это позволяет рассматривать данный параметр в дальнейшем в качестве информативного при разработке методик оценки действующих напряжений.

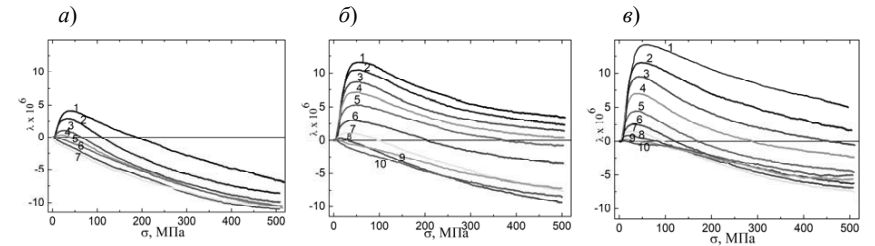


Рис. 3. Зависимости $\lambda(H)$ при различных значениях σ для образцов, предварительно испытанных на циклическое растяжение с различным количеством циклов: а – 0; б – 30; в – 100 тыс. циклов. Кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180 МПа

На рис. 3 приведены полевые зависимости продольной магнитострикции λ при растягивающей нагрузке различной величины для образцов, испытанных на отнулевое циклическое растяжение на 0, 30 тыс. и 100 тыс. циклов соответственно. Как было отмечено в [3], чем на большее количество циклов был циклически нагружен образец, тем выше у него уровень сформировавшихся остаточных сжимающих напряжений вдоль оси растяжения и тем больше площадь положительного участка на зависимости $\lambda(H)$ и величина ее максимума.

С ростом приложенных напряжений величина максимума магнитострикции уменьшается, а при определенной величине напряжений положительный участок полевой зависимости магнитострикции совсем исчезает и магнитострикция, начиная с нулевого значения магнитного поля, принимает только отрицательные значения. Для образца, не подвергнутого циклическому нагружению, это происходит уже при нагрузке 100 МПа, для образца, предварительно циклически нагруженного на 30 тыс. циклов, – в диапазоне растягивающих напряжений от 160 до 180 МПа, для 100 тыс. циклов – выше 180 МПа.

Изменение характера $\lambda(H)$ под действием упругого одноосного нагружения определяет особенности поведения магнитных характеристик под действием тех же нагрузок. В диапазоне напряжений, где произошли смена знака магнитострикции и, соответственно, изменение типа магнитной текстуры, на зависимостях магнитных параметров, измеренных вдоль направления нагружения, от растягивающих напряжений формируются экстремумы.

Таким образом, на примере стали 08Г2Б показано, что предыстория в виде предварительного циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения с амплитудой, соответствующей условному пределу текучести, сказывается на последующих закономерностях изменения магнитных параметров материала при его упругом деформировании. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке магнитных методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния элементов стальных конструкций. Поведение всех исследованных магнитных характеристик, в том числе магнитострикции, при статическом растяжении свидетельствует об усилении напряжений сжатия, обусловленных предварительным циклическим нагружением, в направлении действия циклической нагрузки.

Исследования магнитострикции образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых предварительному отнулевому циклическому растяжению, показали, что последующее деформирование статическим растяжением на определенном этапе приводит к исчезновению положительного участка на полевых зависимостях магнитострикции. Диапазоны растягивающих напряжений, в которых происходит смена знака магнитострикции, а значит,

преломления слоя $n(\lambda, y)$, где λ – длина волны, y – координата, отсчитываемая от поверхности слоя.

В работе исследован слой титаната бария (BaTiO:Eu), нанесенный по золь-гель-технологии на подложку из термически окисленного кристаллического кремния. Для определения оптических характеристик слоя с использованием спектрофотометров MPV SP, Photon RT и спектрального эллипсометра UVISEL 2 (Horiba) были измерены спектры отражательной способности и поляризационных углов. Однако попытки определить оптические характеристики слоя с помощью компьютерных программ, использующих дисперсионные модели однородных слоев, прилагаемых к названным приборам, не позволили удовлетворительно согласовать теорию и эксперимент. В [1] был предложен метод решения более общей обратной задачи отражательной спектрофотометрии неоднородного слоя, основанный на представлении его диэлектрической проницаемости моделью Лорентц-Лоренца. Но алгоритм обработки экспериментальных данных, взятый из [1], также привел к значительному расхождению теории и эксперимента. Авторы связали этот факт с использованием в названном алгоритме приближения $\text{Im } n(\lambda, y) = 0$. Далее предлагается более общая схема решения обратной оптической задачи о спектрофотометрии неоднородного слоя, которая свободна от указанного приближения. Применение этой схемы позволило удовлетворительно описать спектрофотометрические эксперименты для слоя BaTiO:Eu и определить его функцию $n(\lambda, y)$.

Пусть слой занимает область $-d \leq y \leq 0$. В области $y < -d$ находится подложка с известным показателем преломления $n_s(\lambda)$. Плоская волна s либо p поляризации падает на слой под углом θ из области $y > 0$, занятой воздухом. Измеряются спектры энергетических коэффициентов отражения R_k , где k пробегает $K = 2NM$ значений (множитель 2 учитывает s - и p -волны, N – число углов падения, M – число использованных длин волн).

Расчет значений $R_k = |r_k|^2$, где r_k – амплитудный коэффициент отражения плоской волны от слоя, проводим методом стратификации. В нем неоднородный слой заменяется последовательностью m однородных слоев. Толщина слоев $\Delta y = d/m$, диэлектрическая проницаемость j -го слоя $\varepsilon_j = n^2[\lambda, -d + \Delta y(j-0.5)]$ ($j = \overline{1, m}$).

Для волн s поляризации

$$r_k = (ik_y \Psi_{m+1} - \Psi'_{m+1})(ik_y \Psi_{m+1} + \Psi'_{m+1})^{-1},$$

УДК 53.088: 535.016

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ ТИТАНАТА БАРИЯ, ДОПИРОВАННОГО ЕВРОПИЕМ**Л. И. СОТСКАЯ¹, Н. И. СТАСЬКОВ², А. Б. СОТСКИЙ²,
Н. В. ГАПОНЕНКО³, Е. И. ЛАШКОВСКАЯ³, Т. Н. ЕЩИК⁴**¹Белорусско-Российский университет²МГУ имени А. А. Кулешова

Могилев, Беларусь

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники⁴Белмикросистемы НТЦ Филиал ОАО Интеграл

Минск, Беларусь

UDC 53.088: 535.016

**SPECTROPHOTOMETRY OF AN INHOMOGENEOUS LAYER OF
BARIUM TITANATE DOPED WITH EUROPIUM****L. I. SOTSKAYA, N. I. STASKOV, A. B. SOTSKY, N. V. GAPONENKO,
E. I. LASHKOVSKAYA, T. M. ESCHIK**

Аннотация. Разработан алгоритм решения обратной оптической задачи спектрофотометрии неоднородного поглощающего слоя, основанный на полиномиальных представлениях для пространственной и спектральной зависимостей его диэлектрической проницаемости. Применение этой схемы позволило удовлетворительно описать спектрофотометрические эксперименты для слоя титаната бария и определить его оптические характеристики.

Ключевые слова: многоугольная спектрофотометрия, неоднородный поглощающий слой, титанат бария допированный европием.

Abstract. An algorithm for solving the inverse optical problem spectrophotometry of an inhomogeneous absorbing layer, based on polynomial representations for the spatial and spectral dependences of its permittivity, is developed. The use of this scheme has allowed to describe satisfactorily the spectrophotometric experiments for the barium titanate layer and to determine its optical characteristics.

Key words: multi-angle spectrophotometry, non-uniform absorbing layer, europium-doped barium titanate.

При проектировании тонкопленочных покрытий исследователи часто используют литературные данные о показателях преломления и поглощения однородных объемных материалов. Такой подход в ряде случаев приводит к ошибочным результатам, поскольку многие технологии производства покрытий приводят к образованию неоднородных по толщине слоев с характеристиками, отличающимися от известных. В результате возникает проблема контроля комплексного показателя

и типа магнитной текстуры, примерно соответствуют диапазонам напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях от растягивающей нагрузки магнитных характеристик, измеренных в продольном направлении.

Установлено, что такие магнитные характеристики, как продольная коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых циклическому нагружению на разное количество циклов, при последующем статическом растяжении изменяются однозначно в диапазоне напряжений от 0 до 100 МПа, а поперечная коэрцитивная сила демонстрирует монотонное возрастание в диапазоне от 100 до 200 МПа. При этом разность значений коэрцитивной силы, измеренных в продольном и поперечном направлениях, монотонно уменьшается во всем интервале приложенных напряжений 0...200 МПа. Полученные зависимости магнитных характеристик исследованной стали от напряжений статического растяжения при различном количестве циклов предварительного циклического нагружения могут быть использованы при разработке методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния изделий из стали 08Г2Б.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-48-660035_р_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 9. – С. 49–60.
2. Сравнительный анализ поведения магнитных характеристик пластически деформированного металла различных зон сварной трубы при упругой деформации / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2017. – № 9. – С. 26–34.
3. Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2019. – Т. 55, № 11. – С. 21–31.

E-mail: us@imach.uran.ru.

УДК 629.546:539.4+681.7.068

МОНИТОРИНГ МЕСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ТРЮМОВ НАВАЛОЧНЫХ СУДОВ

И. П. ЗАВАЛЬНИЮК, В. Б. НЕСТЕРЕНКО, О. П. ЗАВАЛЬНИЮК

Херсонская государственная морская академия
Херсон, Украина

UDC 629.546:539.4+681.7.068

THE LOCAL STRENGTH OF BULK CARRIERS' HOLDS MONITORING

I. P. ZAVALNIUK, V. B. NESTERENKO, O. P. ZAVALNIUK

Аннотация. В статье раскрыта актуальная проблема мониторинга местной прочности грузовых трюмов балкеров в случае перевозки грузов, имеющих способность разжижаться при превышении их влагосодержания транспортабельного предела влажности. Акцентировано внимание на отсутствии инструментальных методов контроля как состояния груза, так и механических напряжений отдельных элементов корпусной конструкции. Предложено оборудовать грузовые трюма навалочных судов волоконно-оптическими датчиками деформации, что обеспечит своевременность обнаружения возникновения разжижения груза, динамический контроль механической нагрузки, а также повысит безопасность мореплавания.

Ключевые слова: местная прочность, мониторинг, разжижение груза, балкер, волоконно-оптические датчики деформации, механические напряжения, запас прочности, безопасность мореплавания.

Abstract. The relevant problem of the local strength of bulk carriers' cargo holds monitoring in the case of the cargo's transport having the ability to liquefy when their moisture content exceeds the transportable moisture limit has been revealed. Attention has been focused on the absence of instrumental control methods of the cargo state and of the mechanical stresses of the hull structure separate elements. It has been proposed to equip the cargo holds of bulk carriers with fiber optic strain sensors in order to ensure timely detection of the occurrence of the cargo liquefaction, dynamic control of the mechanical stress and also to increase the navigation safety level.

Key words: local strength, monitoring, liquefaction cargo, bulk carrier, fiber optic strain sensor, mechanical stresses, safety factor, navigation safety.

Согласно отчету Bulk Carrier Casualty Report за 2019 г. Международной ассоциации владельцев сухогрузов Intercargo, в период с 2010 по 2019 гг. мировым флотом потеряно 39 балкеров дедвейтом свыше 10000 т [1]. Причем основной причиной аварий сухогрузов при перевозке навалочных грузов остается их сдвиг и разжижение. Среди 39 вышеупомянутых сухогрузов было восемь жертв с возникновением сдвига груза, а именно шесть сухогрузов, перевозящих никелевую руду из Индонезии, одно судно с мелкозернистой железной рудой, загруженное с высоким содержанием влаги из Малайзии, и одно судно с бокситом из Малайзии. Примечательно,

Метод геометрической инвариации позволяет сокращать вычислительные затраты за счет сведения задачи к анализу «минимальной» геометрии путем выбора закладываемых в расчет свойств среды. Находя баланс между эквивалентной электропроводностью и магнитной проницаемостью, можно на три-четыре порядка снизить размер итоговой конечноэлементной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Молотиллов, Б. В.** Холоднокатанные электротехнические стали / Б. В. Молотиллов, Л. В. Миронов, А. Г. Петренко. – Москва: Металлургия, 1989. – 168 с.

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

3) наблюдение ведется за сечением кольца, выполненного из стали 3408 (холоднокатаная, электротехническая, анизотропная). Габариты кольца: внутренний диаметр 60 мм, толщина 0,3 мм, высота 10 мм;

4) в качестве основной кривой намагничивания закладывается квазистатическая характеристика, взятая из [1];

5) в качестве результата измерения амплитуды магнитной индукции принимается максимум средней по сечению магнитной индукции за период перемагничивания;

6) в качестве результата измерения амплитуды внешнего магнитного поля принимается максимум среднего по линии над верхней гранью сечения магнитного поля за период перемагничивания. Воспроизводится измерительный принцип катушки поля в отсутствии помех. Расстояние от линии до грани – 0,01 мм;

7) намагничивание производится синусоидальным током. При этом магнитный поток в сечении образца несинусоидален;

8) плотность разбиения для частоты 50 Гц составляет порядка 250 вершин/мм² (треугольные элементы).

Полученные численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [1] для этого же материала на частоте 50 Гц.

Следующим после верификации шагом может являться уменьшение сечения кольца до размеров $0,3 \times 0,3$ мм. Это позволяет значительно снизить число конечных элементов в разбиении. Значения расчетной кривой намагничивания (РКН) при этом изменятся в сторону более высоких индукций, однако характер поведения полностью сохранится. Для того чтобы максимально приблизить значения РКН к экспериментальным, следует в свойствах стали повысить электропроводность (на сколько именно – можно узнать за несколько быстрых расчетов). Это приведет к росту уровня вихревых токов и снижению индукции. Причем увеличение числа конечных элементов для корректного воспроизведения градиента индукции будет в разы меньше, чем снижение их числа за счет уменьшения геометрии. Это позволяет рассчитывать кривые намагничивания на других частотах намного быстрее.

Далее для оценки поведения магнитопровода с одним короткозамкнутым витком можно использовать 2D-приближение – сечение трубы с короткозамкнутым витком в виде противотока, смещенного от центра к периферии. В этом случае будет перемагничиваться только внутренняя часть кольца, поскольку распространение магнитного поля в этой постановке ограничивается экранирующим воздействием самого сечения (дистанция течения тока совпадает с длиной трубы). В этом случае РКН можно корректировать, вводя линейные множители для всей кривой сразу.

что наибольшее количество человеческих жертв 106 из 173 случилось в результате разжижения перевозимого груза.

Самые резонансные катастрофы произошли с балкерами Nasco Diamond (2010), Vinalines Queen (2011), Harita Bauxite (2013), Bulk Jupiter (2015), Stellar Daisy (2017) и Emerald Star (2017). Именно эти трагедии вызвали вопросы к общим принципам транспортировки морем грузов группы А с высокой плотностью и способностью разжижения, а также введением ряда поправок в International Maritime Solid Bulk Cargoes Code (Международный морской кодекс перевозки навалочных грузов), вступающих в силу с 1 января 2021 г.

Опасность перевозки рудных грузов и бокситов состоит в том, что, будучи тяжелыми грузами (удельный погрузочный объем менее $0,7...1,0$ м³/т), они обладают способностью разжижаться в случае, если в процессе погрузки или морской перевозки их влагосодержание превысит установленный для них транспортабельный предел влажности (TML). Причем состояние разжижения наступает, когда масса зернистого груза, насыщенного влагой, под влиянием значительных внешних сил, таких как вибрация, ударные воздействия или качка судна, теряет свое внутреннее сопротивление сдвига и начинает вести себя как жидкость [2]. Кроме того, вследствие небольшого объема, занимаемого рудными грузами, они размещаются в трюме обычного сухогруза на втором дне относительно тонким слоем. Низкое положение центра тяжести тяжелых навалочных грузов при стандартной высоте двойного дна увеличивает метацентрическую высоту и вызывает порывистую и порой опасную бортовую качку. Эти последствия не удастся эффективно нейтрализовать чисто технологическими способами в процессе загрузки, например, искусственно повышая центр тяжести груза неравномерным его размещением по трюмам и загрузкой твиндека, или штивку после загрузки.

Поведение разжиженного груза может проявляться появлением одного из двух эффектов [3]:

1) «эффект свободной поверхности» (рис. 1, а), когда груз, перешедший в вязкое разжиженное состояние (пульпу), может перетекать к одному из бортов судна при крене в условиях качки и не полностью возвращаться в обратную сторону. Затем судно может испытывать постепенно увеличивающийся угол крена, что может привести к внезапному опрокидыванию;

2) «эффект скольжения» (рис. 1, б), свойственный для грузов с высоким влагосодержанием, особенно, если груз загружен малым слоем и судно подвергается воздействию больших углов крена. Тогда груз теряет свое сцепление и становится менее липким. Когда судно кренится, верхняя часть груза может отделяться и скользить в одну сторону. Это переносит груз и его вертикальный центр тяжести в одну сторону, что вызывает появление кренящего момента, который негативно влияет на остойчивость судна и может вызвать повреждение элементов конструкции.

Результатом смещения груза в рейсе являются возможные потеря устойчивости судна и возникновение повреждения элементов конструкции (твиндековых палуб, люковых крышек и т. п.) и самого корпуса. Крайний опасный случай – перелом корпуса на волнении из-за резко неравномерной загрузки трюмов по длине судна тяжелым навалочным грузом. Деформации и перелом корпуса с недостаточной общей прочностью могут происходить (и происходили) даже на тихой воде, у причала, при неправильной загрузке железной руды на судах внутреннего плавания.

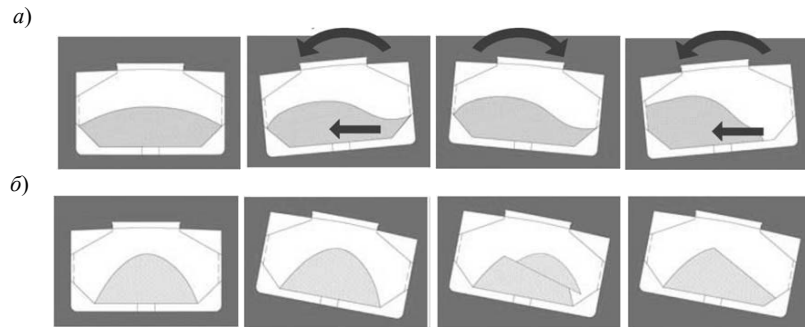


Рис. 1. Поведение разжиженного груза: а – «эффект свободной поверхности»; б – «эффект скольжения»

Возможные структурные повреждения связаны с тем, что давление, оказываемое на негоризонтальные границы грузового отсека, такие как поперечные переборки, выше для жидкости, чем для насыпного груза. Как правило, давление увеличивается в 2 или 3 раза. Причем вопрос прочности конструкции рудовозов может быть более серьезным, чем для обычных сухогрузов, из-за более высокого заполнения грузового отсека, а также, поскольку границы грузового отсека не рассчитаны на то, чтобы выдерживать затопление. К тому же, если в рудовозы были переоборудованы танкеры с целью продления термина эксплуатации устаревших судов. Примером являются аварийная ситуация и конструкционные повреждения судна Stellar Daisy из-за экстремальной нагрузки разжиженного груза. На рис. 2 показаны области трюма, которые требуют особого внимания для стандартного рудовоза с точки зрения обеспечения прочности конструкции.

Так, зонами повышенного внимания являются:

1) продольные переборки, где нагрузки бокового давления будут значительно увеличены на пластинах и ребрах жесткости, что приводит к высокому напряжению сдвига, следовательно, они должны быть усилены;

Наибольшая неоднородность наблюдается при единичной проницаемости. Таким образом, необходимо обеспечить снижение проницаемости сердечника, например, за счет введения его в насыщение и/или перемагничивания повышенной частотой. Снижение проницаемости с одной стороны увеличивает неоднородность распределения индукции по сечению, а с другой – снижает отношение сигнал/шум для ЭДС самоиндукции (и тока) КЗ-витка. При этом рост частоты увеличивает соотношение сигнал/шум, а также снижает намагничивающий ток вследствие роста импеданса нагрузки. Также параметры рабочей точки не должны приводить к перегреву изделия.

Для упрощения разработки и отладки оборудования неразрушающего контроля следует определить оптимальный набор информативных параметров. В данной задаче частота и амплитуда сигнала перемагничивания являются параметрами, управление которыми наиболее технологично (с учетом проведения остальных испытаний).

Изменение частоты перемагничивания способно очень сильно влиять на размерность задачи, поскольку накладывает ограничения на максимальный размер конечного элемента (он должен быть в 3 раза меньше, чем толщина скин-слоя). Применение эквивалентных кривых намагничивания, отражающих поведение материала (зависимость амплитуды средней по сечению магнитной индукции от амплитуды внешнего магнитного поля) на определенных частотах, позволяет моделировать материал с нулевой электропроводностью, устраняя скин-эффект, как фактор нелинейности. Такой подход снижает общую размерность задачи в сотни раз.

Витой магнитопровод, являющийся типовым для рассматриваемой задачи, может иметь до пятидесяти слоев стали, навитых друг на друга. Исключение из рассмотрения межслоевого взаимодействия (рассмотрение одного витка из пятидесяти) мало влияет на точность получения эквивалентной кривой намагничивания, необходимую для оценки поведения этой магнитной цепи.

Типовая конфигурация для получения эквивалентных кривых намагничивания может быть следующей:

1) осесимметричная двухмерная задача;

2) намагничивание производится одиночным током, текущим по оси симметрии объекта (отличия по уровню магнитной индукции от намагничивания тороидальной обмоткой менее 10 %; при этом центрально-симметричное намагничивание намного проще формализуется и позволяет избежать проблем сходимости в случае использования токонесущей поверхности для описания сечения тороидальной обмотки);

переход из 3D в 2D для осесимметричных задач), так и рассмотрением эквивалентной задачи той же размерности, имеющей другую геометрию. Именно геометрия в сочетании со скоростью пространственного изменения (градиента) рассматриваемой величины определяет требования к параметрам сети конечных элементов (их количество задает количество неизвестных в системе уравнений). Численное моделирование в случае задач с известным решением (например, классических либо вошедших в отраслевые справочники) позволяет провести предварительную верификацию ресурсосберегающего метода, а затем распространить его на задачу, размерность для которой нужно снизить. В этом и заключается геометрическая инвариация – сохранение информативных характеристик поведения системы при изменении её геометрии.

В качестве примера рассмотрим задачу обнаружения короткозамкнутого витка малого диаметра на тороидальном магнитопроводе. Специфика задачи – в малом диаметре провода обмотки (порядка 0,1 мм) и большом количестве (до 10000) исправных витков, что делает невозможным выявление такого витка стандартным методом (по току холостого хода). В этом случае требуемая точность измерения тока значительно превышает достижимую точность измерения электрических величин в цепях с магнитным сердечником.

Постановкой задачи является определение условий, при которых влияние одного короткозамкнутого витка становится значимым.

Если рассматривать намагничивание тороидального магнитопровода одиночным витком с током (при условии, что по остальным виткам в обмотке ток не протекает), то распределение магнитной индукции по окружности быстро становится однородным уже при проницаемостях порядка 50...500 (рис. 1).

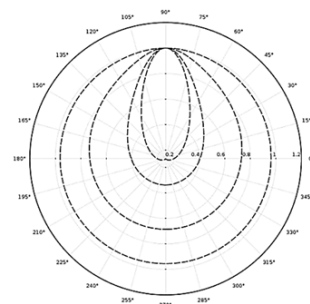


Рис. 1. Относительное распределение магнитной индукции по средней линии тороидального сердечника при различных проницаемостях: 1, 10, 50, 500. Намагничивание осуществляется единичным витком, облегающим сечение по малому радиусу. Внутренняя пунктирная линия соответствует единичной проницаемости; внешняя – 500

2) пластины и ребра жесткости нижней части опор будут испытывать более высокие усилия на сжатие и изгиб, поэтому диафрагмы внутри опор могут нуждаться в подкреплении;

3) поперечные гофрированные переборки, усиление которых зависит от соответствующих условий и высоты заполнения грузом.

Кроме приведенных рекомендаций по укреплению соответствующих зон грузовых трюмов, на сегодняшнее время существуют следующие инструкции при перевозке грузов группы А (имеющих способность разжижаться при превышении влагосодержания величины TML) согласно IMSBC Code [2]:

1) при загрузке необходимо проверить показатели содержания влаги согласно грузовой декларации и проводить визуальную инспекцию состояния груза;

2) во время рейса обязательны ежедневные проверка грузового трюма и визуальный контроль состояния поверхности груза, а именно проверка возможного наличия и миграции свободной влаги. Причинами изменения влажности груза могут быть погодные условия и сильные осадки при загрузке, возможные неисправности системы вентиляции и осушения в грузовых трюмах. При необходимости следует предусмотреть возможность вентиляции груза, что зависит от рекомендаций IMSBC Code в отношении конкретного груза;

3) мониторинг за движением судна, в частности периодом бортовой качки. Изменение периода качки может предупреждать об уменьшении метacentрической высоты GM судна.

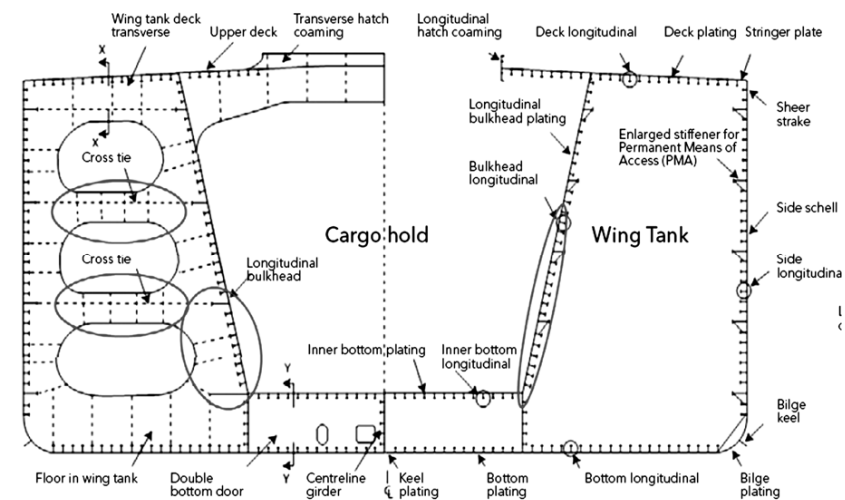


Рис. 2. Зоны грузовых отсеков рудовозов особого внимания

Итак, выводы о состоянии перевозимого рудного груза делаются исключительно по результатам визуального контроля без применения определенных технических средств. Именно человеческий фактор влияет на время выявления разжижения груза и принятия соответствующих мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций.

Поэтому актуальным является предложение об установке в грузовых отсеках навалочных судов системы мониторинга местной прочности трюмов, которая путем фиксации повышенного давления и деформаций переборок позволит своевременно и быстро определить изменение состояния груза, тем самым сохранить целостность конструкции и избежать негативных последствий процесса разжижения груза.

В настоящее время существует ряд датчиков механических напряжений, используемых в автоматизированных системах контроля мореходности (АСКМ) для мониторинга общей и местной прочности: электрические, вибрационные и волоконно-оптические тензометры, магнитоупругие и пьезоэлектрические преобразователи, коэрцитивметрические датчики [5]. Измерители напряжений элементов судового корпуса должны иметь точность не хуже $5\mu\epsilon$ и быть способными работать в частотном диапазоне 0...5 Гц.

Мониторинг местной прочности проводится АСКМ с целью предупреждения персонала на мостике, что отдельные компоненты структуры корпуса испытывают локальные нагрузки, приближающиеся к уровню, при котором необходимы действия для их уменьшения. Уровни опасных нагрузок для тревог и границы для предупреждений о приближении нагрузок к этим уровням находятся по одобренным методикам с учетом условий их применения.

Интерес представляют волоконно-оптические датчики деформации (ВОДД), которые перед электрическими измерителями механических напряжений имеют следующие преимущества: небольшие размеры, малый вес, высокое быстродействие и чувствительность, неподверженность коррозии, невосприимчивость к электромагнитным помехам, водонепроницаемость. Кроме того, одно волокно может содержать несколько тензометров. Волоконно-оптические устройства не нуждаются в громоздких защитных кожухах. Они могут быть прикреплены к поверхности материала, встроены в конструкции и позволяют измерять растяжения, сжатия контролируемого объекта, давление, температуру, ударные нагрузки.

Известен успешный и эффективный опыт использования волоконно-оптических датчиков деформации в системах контроля внешних нагрузок на корпус судна (SENSFIB HullTM), в системах контроля слошинга (SENSFIB SloshingTM), в системах контроля ледовой нагрузки на корпус судна (SENSFIB IceTM), а также в разгрузочно-погрузочных системах [6–8].

УДК 621.317.4; 621.317; 004.942

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНОСТЬЮ АНАЛИЗА МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНВАРИАЦИИ

И. Т. СКУРТУ, И. И. БРАНОВИЦКИЙ

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 621.317.4; 621.317; 004.942

MAGNETIC CIRCUITS ANALYSIS COMPLEXITY CONTROL BY MEANS OF GEOMETRIC INVARIATION

I. T. SKURTU, I. I. BRANOVITSKY

Аннотация. Рассматривается подход к снижению размерности конечно-элементных моделей магнитных цепей, основанный на анализе эквивалентной по поведению, но более простой, чем в исходной задаче, геометрии (геометрическая инвариация). На примере анализа задачи обнаружения короткозамкнутых витков показывается серия поэтапных упрощений, приводящая к снижению вычислительных затрат более чем на три порядка по сравнению с прямым конечноэлементным моделированием.

Ключевые слова: магнитная цепь, конечноэлементное моделирование, снижение размерности.

Abstract. The approach to reducing the dimension of the fem models of magnetic circuits based on an analysis of the circuit with simpler geometry (but with equivalent behavior) is considered. On the example of analysis of the problem of short-circuited turns detecting a series of step-by-step simplifications which leads to a reduction in computational costs by more than three orders compared to direct finite element modeling is shown.

Key words: magnetic circuit, finite element modeling, dimension reducing.

Нелинейность реальных задач неразрушающего контроля и прикладной физики в целом создает значительные сложности при моделировании. Часто сразу несколько нелинейных факторов определяют поведение системы, значительно замедляя и усложняя сходимость численных методов.

Прямая линеаризация в нелинейных задачах (например, работа с постоянной магнитной проницаемостью) не всегда допустима. Тем не менее зачастую целью исследования является изучение поведения части системы. В таких случаях можно понижать размерность задачи с помощью специального нелинейного преобразования, связывающего пространство состояний части системы с пространством состояний системы пониженной размерности. В общем случае понижение размерности конечноэлементной задачи выражается в уменьшении числа степеней свободы (количества переменных в системе уравнений), что может достигаться как непосредственным понижением геометрической размерности (например,

соединения пластин и другие объекты сложной формы). Кроме того, следует отметить наличие возможности дистанционного управления с современной следящей системой, а также более приемлемую стоимость по сравнению с подобными устройствами.

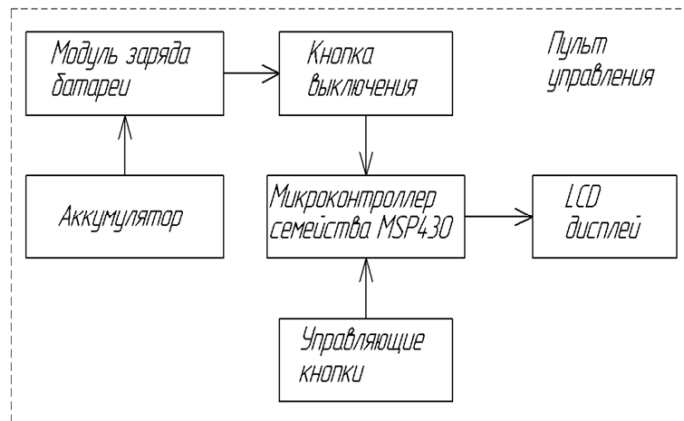


Рис. 8. Структурная схема пульта управления

Разработанное устройство в совокупности с дефектоскопом обеспечивает одновременную реализацию двух эффективных технологий контроля с достаточно высокими метрологическими характеристиками. При этом обеспечивается возможность обнаружения разноориентированных дефектов в сварных соединениях и их распознавания и оценка на новом качественном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никеев, А. М.** Сравнительный анализ изображений дефектов при различных технологиях ультразвукового контроля промышленных объектов / А. М. Никеев, С. В. Михеенко // 56-я студ. науч.-техн. конф. – Могилев, 2020. – С. 131.
2. **Мельников, С. Л.** Исследование возможностей технологии фазированных решёток при ультразвуковом контроле сварных соединений / С. Л. Мельников, В. С. Пугачев, С. С. Сергеев // Информационные технологии, энергетика и экономика: тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Смоленск, 2016. – С. 324–329.
3. Исследование возможностей TOFD-метода ультразвукового контроля сварных соединений // Информационные технологии, энергетика и экономика: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Смоленск, 2014. – С. 204–207.

Поэтому авторы предлагают оборудовать ВОДД грузовые трюма балкеров (рис. 3), перевозящих грузы группы А. Это обеспечит в режиме реального времени контроль давления груза на палубу двойного дна, продольные переборки, их ребра жесткости и балки.

Итак, сравнение напряжений в различных точках трюма позволит:

- 1) своевременно обнаружить возникновение разжижения груза;
- 2) осуществить динамический контроль нагрузок при смещении разжиженного груза;
- 3) снизить риск возникновения аварийных ситуаций и повысить безопасность перевозки рудных грузов;
- 4) обеспечить судоводителя информацией о запасе прочности элементов набора корпуса.

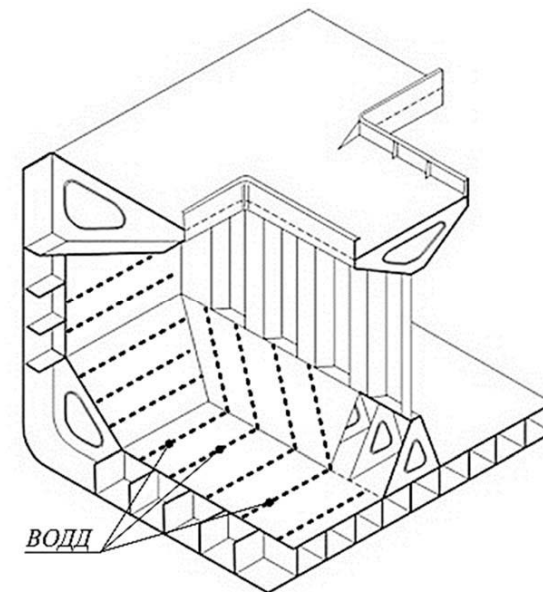


Рис. 3. Места установки волоконно-оптических датчиков деформации в грузовом трюме навалочного судна

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bulk Carrier Casualty Report 2019 [Electronic resource] // International Association of Dry Cargo Shipowners. – UK: London, 2019. – Mode of access: <https://www.intercargo.org/bulk-carrier-casualty-report-2019>.
2. International Maritime Solid Bulk Cargoes Code (IMSBC Code). London: IMO, 2011. – 140 p.

3. Reducing the risk of liquefaction [Electronic resource] // Neuilly-sur-Seine: Bureau Veritas. – France: Paris, 2017. – Mode of access: <https://group.bureauveritas.com/reducing-risk-liquefaction-new-guidance>.

4. Bulk cargo liquefaction. Guideline for design and operation of vessels with bulk cargo that may liquefy [Electronic resource] // DNV GL. – Norway: Oslo, 2019 – Mode of access: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/bulk-cargo-liquefaction.html>.

5. **Мирошников, В. В.** Контроль прочности корпуса судна: монография / В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. – 108 с.

6. Hull Stress Monitoring system [Electronic resource] // Light Structures AS. – Norway: Oslo, 2020 – Mode of access: <http://www.lightstructures.no/hmon.html>.

7. **Ivče, R.** Ship's cargo handling system with the optical fiber sensor technology application / R. Ivče, I. Jurdana, S. Kos // Multidisciplinary SCIENTIFIC JOURNAL OF MARITIME RESEARCH POMORSTVO. – 2014. – № 28. – P. 118–127.

8. Development and Applications of Full-Scale Ship Hull Health Monitoring Systems for the Royal Norwegian Navy / H. E. Torkildsen [et al.] // Research and Technology Organisation (NATO). – 2005. – RTO-MP-AVT-124 – P. 22–1–22–14.

E-mail: zavalnyukinna@gmail.com, nesterenko_mast@mail.ru, olgazavalnjuk82@gmail.com.

записью результатов контроля. В сканере предусмотрена возможность корректировки положения преобразователей относительно сварного шва, возможность работы на различных типах сварных швов. При этом можно обеспечить заданное позиционирование преобразователей относительно сварного шва и фиксацию координаты перемещения с разрешающей способностью не менее 0,5 мм.

Для эффективной работы сканера необходимо, чтобы блок управления выполнял следующие функции:

- управление шаговым электродвигателем;
- регулирование скорости перемещения сканера;
- возможность дистанционного управления.

Исходя из условия дистанционного управления блок управления состоит из двух частей: блока управления в сканере и пульта управления сканером, соединенных между собой кабелем.

В свою очередь, блок управления состоит из драйвера для контроля электродвигателей, вывода для блока, обеспечивающего питание системы, микроконтроллера управляющий системой (рис. 7).

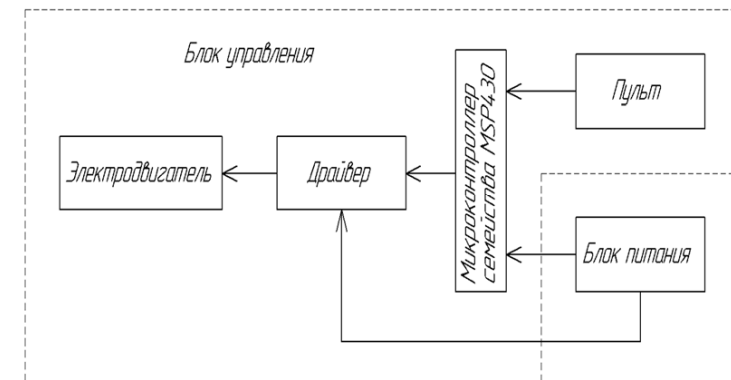


Рис. 7. Структурная схема блока управления

Пульт управления содержит аккумулятор, микроконтроллер, органы управления сканером (кнопки), LCD-дисплей для отображения полезной информации о процессе сканирования, модуль заряда батареи, кнопку выключения (рис. 8).

Разработанный переносной автоматизированный сканер по сравнению с аналогичными устройствами, которые сегодня представлены 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, обечайки, стыковые

системах с возвратно-поступательным сканированием. При этом современные 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 блоками с фазированными антенными решетками (ФАР), что значительно повысило информативность проводимого контроля и расширило функциональные возможности таких сканирующих систем, сделав их универсальными.

В данной работе представлено разработанное универсальное переносное сканирующее устройство (рис. 6) для контроля сварных соединений труб, обечаек, цистерн, резервуаров и прочих подобных конструкций.

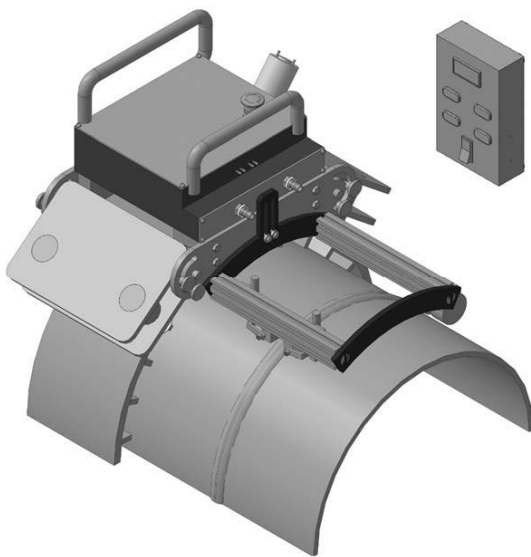


Рис. 6. Универсальное переносное сканирующее устройство

Устройство представляет собой автоматизированную систему, обеспечивающую позиционирование ультразвуковых преобразователей, в том числе и фазированных решеток относительно сварного соединения, прижим ПЭП, перемещение ПЭП вдоль шва.

Структурная схема разработанного сканера обеспечивает перемещение его по заданной траектории вдоль сварного соединения с возможностью регулировки скорости перемещения от 10 до 100 мм/с. При этом в зависимости от выбранных и установленных преобразователей могут быть реализованы одновременно технологии ФАР и TOFD с параллельной

УДК 621.3

АДАПТИВНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОЩНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Е. А. ЗАЙЦЕВ, А. С. ЛЕВИЦКИЙ, В. А. БЕРЕЗНИЧЕНКО, А. Е. СУХОРИКОВА

Институт электродинамики НАН Украины
Киев, Украина

UDC 621.3

ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING CONTROL SYSTEM POWERFUL HYDROGENERATORS MECHANICAL CONDITION *I. O. ZAITSEV, A. S. LEVYTSKYI, V. O. BEREZNYCHENKO, O. E. SUKHORUKOVA*

Аннотация. Представлены результаты разработки, испытаний и применения информационно-измерительной системы, предназначенной для контроля механического состояния мощных гидрогенераторов. Особенностью разработанной системы является использование алгоритмов квазиоптимальной фильтрации данных. Для реализации алгоритма используется информация с дополнительных датчиков, что позволяет компенсировать воздействие внешних и внутренних факторов на результат измерения. Представлены полученные характеристики разработанной системы при её испытании на испытательно-демонстрационном стенде.

Ключевые слова: гидрогенератор, емкостный датчик, воздушный зазор, система, информационно-измерительная система, мониторинг, контроль, механические дефекты.

Abstract. In this paper was presented results of the development, testing and application of an information-measuring system designed to control the mechanical state of powerful hydrogenerators. A feature of the developed system is the use of algorithms for quasi-optimal data filtering. To implement the algorithm, information from additional sensors is used, which makes it possible to compensate for the influence of external and internal factors on the measurement result. The obtained characteristics of the developed system are presented during its testing at the test-demonstration stand.

Key words: hydrogenerator, capacitive sensor, air gap, system, information-measuring system, monitoring, control, mechanical defects.

Введение

В электроэнергетике большинства стран постсоветского пространства изношенность мощного электрооборудования (ЭО) достигает 80 %, поэтому чрезвычайно важным есть оценка его фактического технического состояния. Причем из-за длительной безостановочной эксплуатации ЭО требуется непрерывный контроль и/или мониторинг за изменением его эксплуатационных характеристик [1]. В свою очередь, как указывалось в [2], 24 % всех неисправностей связаны с механическими дефектами

машины, которые непосредственно влияют на эксплуатационные характеристики ЭО.

Для решения задачи непрерывного контроля и/или мониторинга в настоящее время используются различные средства измерения механического состояния гидрогенераторов (ГГ), которые по ряду причин не удовлетворяют современным требованиям к системам проведения непрерывного контроля и мониторинга состояния сложных и дорогостоящих ГГ в ходе их эксплуатации, а именно:

- морально устарели и не отвечают требованиям, которые регламентируются государственными и международными стандартами [3–5];
- требуют значительной адаптации к техническим характеристикам ГГ и условиям эксплуатации информационно-измерительных каналов системы технической диагностики ГГ.

Актуальность исследований

Перечисленные проблемы в значительной степени определяют необходимость разработки специализированных средств измерения параметров механических дефектов с учетом технических характеристик эксплуатируемых на постсоветском пространстве ГГ, значительная часть которых спроектирована и выпущена в эксплуатацию коллективами заводов ГП «Электротяжмаш» (г. Харьков, Украина), «Завод «Электросила» (г. Санкт-Петербург, РФ), НПО «ЭЛСИБ» (г. Новосибирск, РФ) и др.

Учитывая, что одним из основных параметров мощных ГГ является воздушный зазор между статором и ротором машины, в котором механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию, актуальна разработка системы контроля механических параметров мощных гидрогенераторов.

Результаты исследований

В Институте электродинамики НАН Украины авторами предложена информационно-измерительная система контроля механических параметров мощных ГГ, для которой разработаны, изготовлены и испытаны образцы специализированных датчиков, измерительных каналов и программного обеспечения, входящих в состав системы. Разработанная система позволяет контролировать параметры: воздушного зазора от двух до 24-х точек в зависимости от типа ГГ; скорость вращения ротора; параметры вибраций вблизи точки установки датчика воздушного зазора (при необходимости); параметры теплового поля; напряженности переменного магнитного поля. Практическая отработка элементов программно-аппаратного комплекса с целью исследования возможностей контроля и мониторинга технического состояния ГГ при различных режимах работы

объективно определить риск дальнейшей эксплуатации объекта с дефектами и обоснованно разработать программу ремонтных работ.

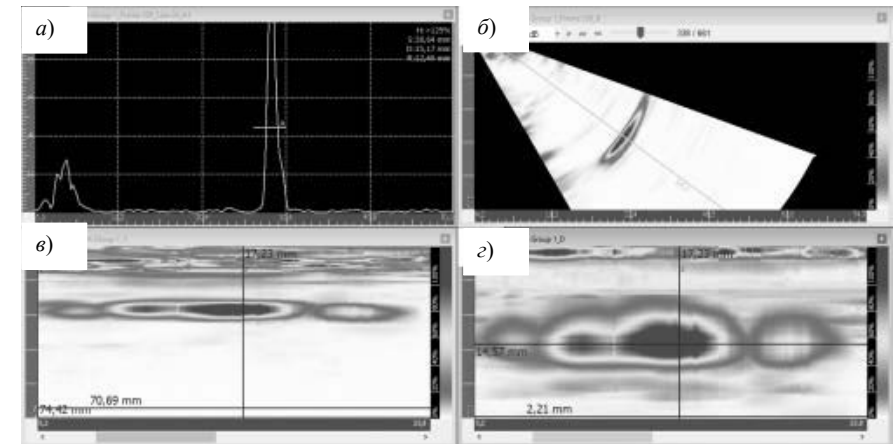


Рис. 4. Отображение дефекта (непровар в корне сварного шва) на экране дефектоскопа SIUI SyncScan ФАР-методом: а – А-развертка для стандартного эхо-метода; б – вид с торца (S-скан); в – вид сверху (C-скан); г – вид сбоку (D-скан)

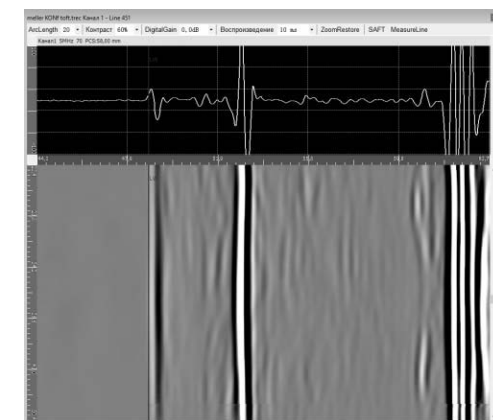


Рис. 5. Отображение дефекта (непровар в корне сварного шва) на экране дефектоскопа SIUI SyncScan дифракционно-временным TOFD-методом

Для автоматизации процесса контроля сегодня часто применяются механизмы сканирования с закрепленной акустической системой (блоком). Рассматриваемые технологии ультразвукового контроля используют продольное сканирование сварного шва, которое проще и надежнее, чем в

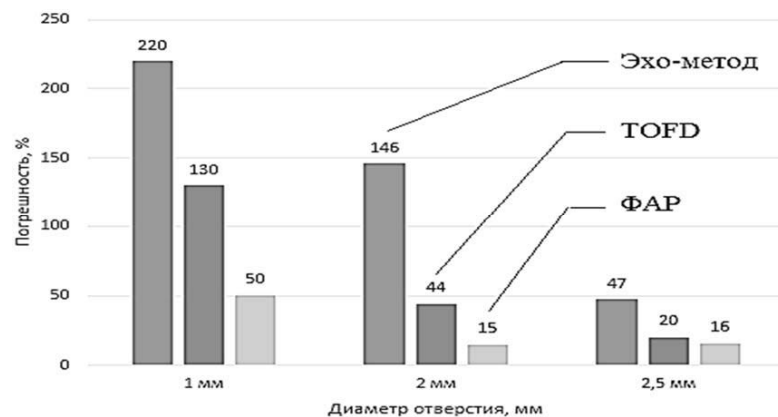


Рис. 2. Погрешность определения размеров бокового отверстия

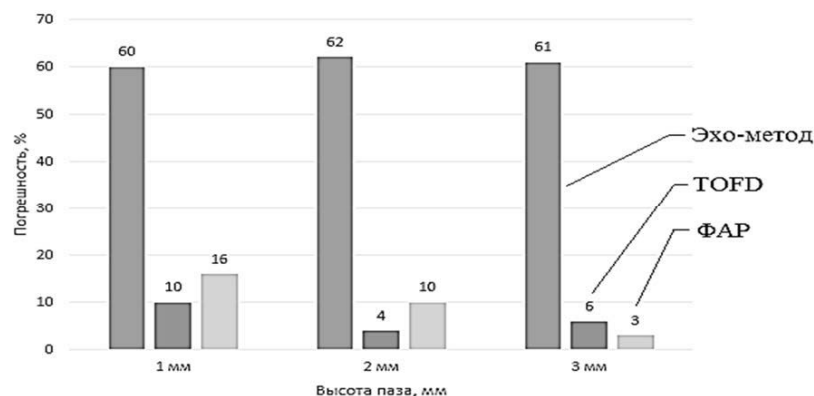


Рис. 3. Погрешность определения высоты паза

Таким образом, можно сделать вывод о том, что высокая достоверность контроля с минимальными погрешностями определения размеров дефектов может быть достигнута при комплексном применении двух современных технологий ультразвукового контроля одновременно. По своей информативности эти технологии дополняют друг друга и облегчают возможности дефектоскопистов при идентификации дефектов и оценке качества сварных швов. Результаты комплексного контроля могут быть положены в основу расчетов на прочность и прогнозирования остаточного ресурса сварных объектов. Таким образом, появляется возможность

проводилась на разработанном масштабном испытательно-демонстрационном стенде (рис. 1).

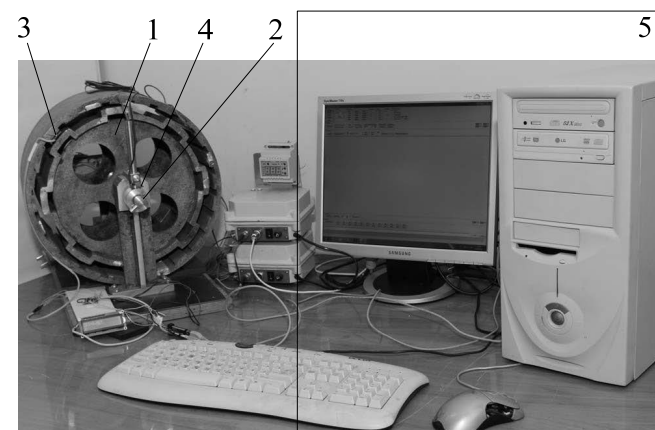


Рис. 1. Общий вид испытательно-демонстрационного стенда: 1 – макет генератора; 2 – вал; 3 – датчики воздушного зазора, температуры и теплового поля; 4 – датчик метки вала; 5 – система контроля механических параметров

Практическая разработка и наладка работы измерительных каналов системы осуществлялась с учетом характеристик капсульного гидрогенератора SGK638-160/70M, эксплуатируемого на Киевской и Каневской ГЭС. Система имеет четыре идентичных измерительных канала со следующими характеристиками:

- диапазон измерения значения воздушного зазора от 2 до 10 мм;
- нечувствительность к воздействию магнитного поля в пределах до 0,68 Т;
- диапазон рабочих температур от -40 до +125 °С;
- погрешность измерения воздушного зазора с учетом программного алгоритма адаптивного подавления неинформативных параметров не более 1 %.

Проведенные исследования емкостного датчика воздушного зазора с планарным размещением электродов представлены в [6–10].

Особенностью системы является то, что её работа основана на использовании алгоритмов квазиоптимальной фильтрации данных. Такой подход позволяет обеспечить точность определения значения воздушного зазора в динамическом или статическом режиме эксплуатации ГГ, а также характеристики, которые могут быть получены как производные с учетом пространственно-временной привязки полученных данных (годограф [11], эксцентриситет [12], форма ротора и статора [9, 13] и т. д.). Для реализации

алгоритма была разработана блочно-модульная архитектура системы (рис. 2), что позволяет обеспечить гибкость, взаимозаменяемость и возможность адаптации системы под различные типы ГГ.

Система состоит из измерительного модуля (количество модулей варьирует в зависимости от типа ГГ), датчика метки вала 6, коммутатора 7, рабочей станции 8, содержащей в себе операционную систему 9, специализированное программное обеспечение обработки данных 10 и базу данных 11. Для удобства работы оператора 12 рабочая станция может быть дополнена программным обеспечением для визуализации данных с интерфейсом типа Human Machine Interface.

Измерительный модуль состоит из измерителя воздушного зазора 5, который содержит емкостный датчик воздушного зазора 1 и датчик температуры 2, а также модуль имеет датчик напряженности переменного магнитного поля 3 и микроконтроллер 4.

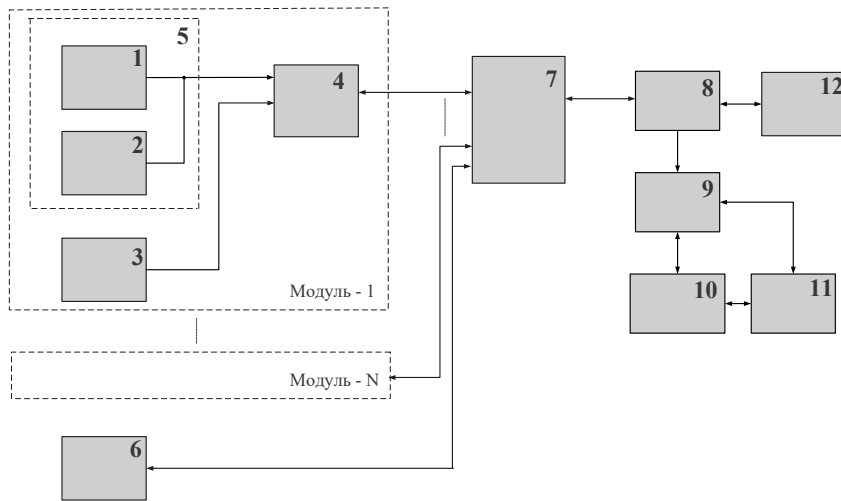


Рис. 2. Блочно-модульная архитектура системы

Рассмотрим более детально работу элементов системы. В динамике для точного определения значения воздушного зазора над каждым из полюсов система использует дополнительные компоненты, среди них основными являются датчик метки вала 6 и датчик напряженности переменного магнитного поля 3. Датчики используются для синхронизации работы системы контроля и диагностики воздушного зазора с другими системами технической диагностики мощных генераторов, а также для пространственной привязки полученных данных к полюсам. Другим вариантом является использование сигнала с емкостного сенсора в качестве генератора

Сегодня на рынке имеется достаточно большое количество различных приборов, которые несущественно отличаются по своим метрологическим и функциональным возможностям. В данном случае для реализации технологии ФАР применялся дефектоскоп SIUI SyncScan (рис. 1, *a*) с частотой преобразователя 4 МГц и диапазоном углов ввода от 30 до 70°. При контроле эхо-импульсным методом использовался прибор УД4-76 (рис. 1, *б*) с частотой преобразователя 2,5 МГц и углом ввода 65°. В обоих случаях использовалась схема прозвучивания прямым и однократно отраженным лучом. Контроль дифракционно-временным методом проводился также прибором SIUI SyncScan в TOFD-режиме продольными волнами на частоте 5 МГц при угле ввода 60°, размер дефектов определялся по полученным изображениям.

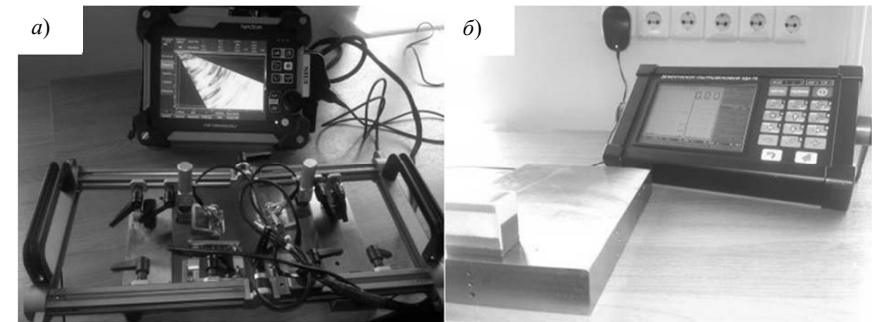


Рис. 1. Оборудование для контроля сварных швов различными методами

Результаты экспериментальных исследований тест-образцов с боковыми отверстиями и вертикальным пазом отображены на графиках (рис. 2 и 3).

Из приведенных графиков видно, что погрешности определения размеров компактных дефектов у технологий ФАР и TOFD сопоставимы и существенно меньше, чем при использовании традиционного эхо-импульсного метода. Кроме того, совершенно очевидно, что при использовании технологии ФАР изображение дефекта на экране дефектоскопа нагляднее и комфортнее по восприятию в сравнении с TOFD и эхо-импульсным методами. Примеры приведены на рис. 4 и 5.

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать вывод о том, что технология ФАР обеспечивает высокую достоверность выявления и достаточно высокую точность определения размеров внутренних дефектов типа несплошностей. Однако погрешности измерения размеров дефектов плоскостного типа дифракционно-временным методом существенно меньше, чем фазированными решетками.

амплитудно-временных или А-разверток. Если формировать пакеты А-разверток при сканировании объектов по одной или двум взаимно перпендикулярным координатам через определенный шаг, то появляется возможность формирования двумерных или трехмерных изображений элементов структуры объекта на мониторе дефектоскопа. В практике сегодня используются различные технологии ультразвукового контроля сварных соединений, в частности, амплитудные и временные с различными схемами прозвучивания объекта. При этом изображения одних и тех же дефектов на экранах дефектоскопов существенно отличаются и по-разному воспринимаются оператором [1].

Для оценки информационных и метрологических возможностей комплексного ультразвукового контроля сварных швов в данной работе были проведены экспериментальные исследования технологии ФАР и технологии дифракционно-временного метода TOFD. При этом основное внимание уделялось погрешностям при определении размеров различных дефектов. В качестве объектов исследования использовались искусственные отражатели в виде боковых отверстий и пазов, имитирующие объемные и плоскостные дефекты.

Технология на основе TOFD-метода реализуется с использованием пары специальных ультразвуковых преобразователей, расположенных по разные стороны от дефекта. Пучок ультразвуковых лучей, излученных одним преобразователем, взаимодействует с поверхностью дефекта и принимается другим преобразователем. Вторичные волны, получившиеся в результате дифракции на концах дефекта, складываются с обычными отраженными волнами и распространяются от кончиков в виде широких пучков лучей. Время прохождения регистрируемых сигналов является мерой оценки высоты дефектов, тем самым позволяя измерить дефект. Размер дефектов всегда определяется временем прохождения дифракционных сигналов. При этом амплитуда сигнала, как правило, не является информационным параметром.

Технология контроля с использованием в качестве преобразователя линейной фазированной решетки основана на возможности программного управления акустическим полем излучения при сканировании объекта. Преобразователь выполняет функции излучателя с переменным углом ввода, т. е. обеспечивается качание луча в определенном диапазоне углов в вертикальной плоскости. Таким образом, можно сформировать специальную секторную развертку, 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 [2, 3].

метки полюса вала. В этом случае в схему (см. рис. 2) дополнительно включается компаратор. На один из входов компаратора подается выходное напряжение вторичного измерительного преобразователя, на другой вход – предельно установленное напряжение с опорного источника питания. Когда на входе компаратора напряжения становятся равными, на выходе компаратора формируется логическая единица, которая запускает аналого-цифровой преобразователь, содержащийся в микроконтроллере 4, предназначенный для формирования цифровых отсчетов о значении воздушного зазора [14].

На генераторах, работающих в маневренных режимах или когда использование собственного синусоидального напряжения невозможно (например, при отсутствии возбуждения ротора, когда в обмотках статора практически отсутствует напряжение), как генератор метки полюса вала используется сенсор метки вала. В этом случае частота его импульсов в n раз меньше частоты следования полюсов возле емкостного датчика воздушного зазора. Для формирования сигнала необходимой частоты, жестко привязанного по фазе к временному положению метки вала, может быть применен известный принцип фазовой автоподстройки частоты.

Для компенсации погрешности от воздействия на результат измерения вихревых токов, создаваемых на поверхности датчика воздушного зазора тангенциальной составляющей переменного магнитного поля, используется датчик напряженности переменного магнитного поля, который в опытно образце был выполнен в виде витка катушки и размещен непосредственно возле датчика воздушного зазора. Также дополнительно с целью минимизации погрешности от воздействия внешних факторов на результат измерения воздушного зазора могут использоваться вибродатчики, устраняющие погрешности, которые обусловлены вибрациями статора относительно ротора.

Использование полученных таким образом данных позволит:

- повысить надежность работы и эксплуатации ГГ;
- повысить точность определения и анализа причин, вызывающих появление дефектов [9, 15–17];
- обеспечить выполнение норм, заложенных в стандарте документа ISO 20816-5 «Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants», который разрабатывается на замену действующему сегодня стандарту ISO 7919-5:2005 [3].

Основным отличием нового стандарта от существующего является требование в отслеживании тренда изменения амплитуды и фазы измеряемых сигналов во времени. Использование тренда как информационного параметра позволяет контролировать изменение состояния ЭО, в том числе и ГГ в низкочастотной полосе, что невозможно при применении штатных средств контроля – акселерометров.

Заключение

Испытания лабораторного образца разработанной информационно-измерительной системы контроля механического состояния мощных гидрогенераторов показали высокую эффективность применения разработанного экспериментального образца и его возможность использования в составе комплекса средств технической диагностики ГГ. Использование предлагаемой системы позволяет существенно уменьшить трудоемкость выполнения операций контроля фактического технического состояния ГГ посредством измерения воздушного зазора на остановленном ГГ, а также в различных режимах его эксплуатации, что в свою очередь повысит надежность работы и эксплуатации генерирующего оборудования гидроэлектростанций стран постсоветского пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. Кн. 2: Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. Insulation Failure Mechanisms of Power Generators / R. Brusch [et al.] // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2008. – № 24 (4). – С. 17–25.
3. **ISO 7919-5:2005.** Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants.
4. **ДСТУ ISO 7919-5:2014.** Вібрація механічна. Оцінювання стану машин за результатами вимірювання вібрації на обертових валах. Ч. 5: Агрегати гідроелектростанцій та насосних станцій (ISO 7919-5:2005, IDT). – [Чинний від 2015-07-01]. – 2016. – 15 с.
5. **ISO 10817-1: 1998 (E).** Rotation shaft vibration measuring systems. – Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration.
6. **Зайцев, Є. О.** Експериментально-теоретичні дослідження ємнісного сенсора повітряного зазору для гідрогенераторів методами регресійного аналізу / Є. О. Зайцев, А. С. Левицький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 2. – С. 35–40.
7. Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів / Є. О. Зайцев [и др.] // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. – № 24 (100). – С. 151–161.
8. **Zaitsev, Ie. O.** Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenator / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas // First Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON): Proceedings of the 2017 IEEE, May 29 – June 2 2017 Kiev. – 2017. – P. 390–394.

УДК 620.179

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

С. С. СЕРГЕЕВ, А. М. НИКЕЕВ, О. С. СЕРГЕЕВА

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 620.179

ASSESSMENT OF METROLOGICAL POSSIBILITIES OF INTEGRATED ULTRASONIC TESTING OF WELDED JOINTS S. S. SERGEEV, A. M. NIKEEV, O. S. SERGEEVA

Аннотация. Рассмотрены вопросы совершенствования ультразвукового контроля сварных соединений на основе комплексного применения двух современных технологий на основе фазированных решеток и дифракционно-временного метода (TOFD). Проведены экспериментальные исследования и показаны возможности повышения достоверности контроля и точности определения размеров дефектов за счет одновременного использования двух технологий ультразвукового контроля сварных швов с применением автоматизированного сканера.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, фазированная решетка, дифракционно-временной метод, чувствительность, сканер.

Abstract. The issues of improving the ultrasonic testing of welded joints on the basis of the complex application of two modern technologies based on phased arrays and the Time-of-flight diffraction method (TOFD) are considered. Experimental studies have been carried out and the possibilities of increasing the reliability of testing and the accuracy of determining the size of defects due to the simultaneous use of two technologies for ultrasonic testing of welded seams using an automated scanner are shown.

Key words: ultrasonic testing, phased array, Time-of-flight diffraction method, sensitivity, scanner.

На сегодняшний день значимость неразрушающего контроля сварных соединений различных промышленных объектов постоянно возрастает, так как ужесточаются требования к безопасной эксплуатации этих объектов. Среди большого арсенала методов и средств контроля ведущее место по праву занимают ультразвуковые исследования. И здесь следует отметить, что совершенствование технологий ультразвукового неразрушающего контроля промышленных объектов в современных условиях базируется, как правило, не на новых физических явлениях при взаимодействии акустических полей с материалами и средами, а на использовании новых алгоритмов обработки сигналов с формированием и отображением информации в виде, удобном для восприятия оператора. При этом изображение дефектов различного типа, таких как несплошности и включения в виде неоднородностей, формируется на основе первичных

7. **Сандомирский, С. Г.** Структурная чувствительность максимальной магнитной проницаемости. Ч. 1: Статистический анализ связи максимальной магнитной проницаемости сталей с параметрами петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12 (186). – С. 33–38.

8. **Сандомирский, С. Г.** Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2013. – № 2. – С. 57 – 60.

9. **Костин, В. Н.** Некоторые возможности повышения достоверности магнитного контроля прочностных свойств горячекатаных труб из стали 37Г2С / В. Н. Костин, А. А. Осинцев, Е. Ю. Сажина // Дефектоскопия. – 2002. – № 12. – С. 52–57.

10. **Сандомирский, С. Г.** Анализ возможности измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С. Г. Сандомирский // Метрология. – 2010. – № 3. – С. 33–41.

11. **Новицкий, П. В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 640 с.

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

9. **Зайцев, Е. А.** Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов / Е. А. Зайцев, А. С. Левицкий, В. Е. Сидорчук // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 8 (2). – С. 122–130.

10. **Zaitsev, Ie.** Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. Clean Generators – Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators / Ie. Zaitsev, A. Levytskyi // Intechopen. – 2020. – P. 25–42.

11. **Левицкий, А. С.** Спосіб визначення деяких механічних дефектів потужних генераторів за результатами вимірювання повітряного зазору / А. С. Левицкий, Є. О. Зайцев, С. А. Закусило // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси ПРТК-2018: тези доповіді X Міжнар. наук.-практ. конф. 22–23 травня 2018 м. – Київ: НАУ, 2018. – С. 111–113.

12. **Зайцев, Є. О.** Програмно-математичне забезпечення систем ідентифікації ексцентриситету ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев // Гідроенергетика України. – 2018. – № 3–4. – С. 50–56.

13. **Зайцев, Є. О.** Аналітичне визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора гідро-генератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев, А. С. Левицкий // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2018. – № 50. – С. 62–70.

14. **Левицкий, А. С.** Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія / А. С. Левицкий, Г. М. Федоренко, О. П. Грубой. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.

15. **Зайцев, Є. О.** Комп'ютеризована система контролю механічних параметрів електрообладнання / Є. О. Зайцев // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016): матеріали XIII Міжнар. конф., 3–6 жовтня 2016 р. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – С. 116–118.

16. **Зайцев, Є. О.** Програмно-математичне забезпечення систем ідентифікації ексцентриситету ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев // Гідроенергетика України. – 2018. – № 3–4. – С. 50–56.

17. **Муравлев, О. П.** Определение неравномерности воздушного зазора в асинхронных двигателях по данным ОТК о числе задеваний ротора за статор / О. П. Муравлев, Э. К. Стрельбицкий // Изв. Томского политех. ин-та [Известия ТПИ]. – 1966. – Т. 145. – С. 121–127.

E-mail авторов: zaitsev@i.ua.

УДК 658.562:681.518.54

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ И СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЗВУКОВОМУ ИНДЕКСУ

Е. З. КОВАРСКАЯ, И. Б. МОСКОВЕНКО, И. В. ПАВЛОВ

ООО «ЗВУК»

Санкт-Петербург, Россия

QUALITY CONTROL AND CONTROL OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID AND SUPERSOLID MATERIALS BY SOUND INDEX

E. Z. KOVARSKAYA, I. B. MOSKOVENKO, I. V. PAVLOV

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы определения показателей качества и, в частности, интегральных физико-механических характеристик изделий из твёрдых и сверхтвёрдых материалов в изделиях по их резонансным частотам и обосновывается возможность применения для оценки качества материалов в изделиях предлагаемого критерия – звукового индекса (ЗИ). Рассматриваются результаты практического применения ЗИ для оценки качества абразивных и других изделий из высокопрочных конструкционных материалов.

Ключевые слова: частота собственных колебаний (ЧСК), композиционные материалы, резонансные частоты, физико-механические характеристики, качество, контроль, приборы, методика контроля.

Abstract. The article considers the issues of determining the quality indicators and, in particular, the integral physical and mechanical characteristics of products made of solid and superhard materials in products based on their resonant frequencies and substantiates the possibility of using the criterion proposed by the authors – the sound index (SI) for evaluating the quality of materials in products. The article considers the practical results of the practical application of SI for evaluating the quality of abrasive products, and other products made of high-strength structural materials.

Key words: natural oscillation frequency (HSC), composite materials, resonant frequencies, physical and mechanical characteristics, quality, control, devices, control methods.

Целью статьи является обсуждение возможностей и опыта использования частот собственных колебаний (ЧСК) изделий и специально подготовленных образцов для оценки физико-механических свойств и оценки других качественных показателей различного рода материалов и изделий, в первую очередь из композиционных материалов с большим затуханием акустических волн, для которых применение традиционных методов звукового и ультразвукового контроля затруднено или вообще невозможно. Это, прежде всего, изделия из керамических, полимерных и композиционных материалов, а также изделия с поверхностью, затрудняющей введение ультразвуковых колебаний, например, чугунное литье, огнеупоры, абразивные изделия и т. п.

Приведенные в таблице данные показывают, что величина $\bar{\sigma}_F$ СКО между результатами расчета твердости HRC стали 45 по формуле (3) с использованием формул (11) и (12) и результатами ее измерения меньше соответственно в 2,44 и 2,66 раза величин σ_1 и σ_2 СКО между результатами расчета твердости HRC стали 45 по формулам (11) и (12) и ее измерения.

Выводы

1. Эффект снижения среднего квадратического отклонения σ_F определения твердости стали (физической величины F) при использовании второго параметра x_2 в наибольшей степени проявляется при обратной корреляционной связи между параметрами x_1 и x_2 с максимальным модулем $|R|$ коэффициента R корреляции между ними. Наиболее существенное снижение σ_F имеет место при близких величинах СКО σ_1 и σ_2 между истинными значениями F и значениями, рассчитанными по результатам косвенных измерений F с использованием каждого из параметров x_1 и x_2 .

2. На примере сталей 40X и 45 показано, что при выполнении указанных в п. 1 условий использование суперпозиции результатов измерения их коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r позволяет с большей достоверностью, чем при использовании только одного из этих параметров, определить их физико-механические свойства после отпуска при разных температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 6: в 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля / В. В. Клюев [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2006. – 848 с.
2. Магнитные и электрические свойства конструкционных и низколегированных сталей / Н. Я. Белов [и др.] – Ленинград: Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1969. – 36 с.
3. Экспериментальное исследование статистической взаимосвязи магнитных и механических параметров конструкционных сталей / А. Я. Аронов [и др.] // Дефектоскопия. – 1988. – № 3. – С. 25–31.
4. Бидя, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бидя, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
5. Сандомирский, С. Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 13–17.
6. Сандомирский, С. Г. Изменение чувствительности магнитного метода контроля физико-механических свойств сталей при намагничивании изделий в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1998. – № 7. – С. 72–81.

$$\sigma_B(\text{МПа}) = \varphi_1(M_r) = -1,9654\tau_1 M_r + 3323,1; \quad (9)$$

$$\sigma_B(\text{МПа}) = \varphi_2(H_c) = 870,13 \ln(\tau_2 H_c) - 5008,1, \quad (10)$$

где τ_1 и τ_2 – размерные множители, $\tau_1 = 1 \text{ м/кА}$ и $\tau_2 = 1 \text{ м/А}$.

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что величина СКО между результатами расчета σ_B стали 40X по формуле (3) с учетом формул (9) и (10) и результатами измерения σ_B стали 40X в [12] составила соответственно 85 и 78 % от величин СКО между результатами измерения σ_B стали 40X в [2] и расчета σ_B по формулам (9) и (10).

В качестве примера результаты анализа подтверждены также снижением погрешности определения твердости HRC стали 45, подвергнутой после закалки низкотемпературному отпуску, по результатам измерения ее H_c и M_r по сравнению с использованием любого из этих параметров (табл. 2). Для анализа использованы результаты измерения в [2] остаточной индукции B_r , H_c и HRC стали 45. Коэффициент R корреляции между M_r и H_c по данным табл. 2 составил -0,88. Статистическая обработка корреляционных зависимостей между H_c и HRC, M_r и HRC и построение линий тренда (полиномы второй степени) этих зависимостей проведены в программе Microsoft Excel. Получены следующие уравнения для определения твердости HRC стали 45 по результатам измерения их H_c и M_r :

$$\text{HRC} = \varphi_1(H_c) = -2,9748(\tau_3 H_c)^2 + 22,934\tau_3 H_c + 16,575; \quad (11)$$

$$\text{HRC} = \varphi_2(M_r) = 81,658(\tau_4 M_r)^2 - 230,33\tau_4 M_r + 199,15, \quad (12)$$

где τ_3 и τ_4 – размерные множители, $\tau_3 = 1 \text{ м/кА}$ и $\tau_4 = 1 \text{ м/МА}$.

Табл. 2. Результаты измерения магнитных параметров и твердости HRC стали 45 в [2, рис. 19–21] и результаты расчета ее HRC по разным методикам

T_o , °C	Результаты измерения в [2]			Результаты расчета HRC по формулам		
	H_c , кА/м	M_r , МА/м	HRC	(11)	По (12)	(3), (11), (12)
20	3,184	0,883	60	59,44	59,44	59,44
100	3,120	0,883	59	59,17	59,44	59,305
200	2,388	1,003	53	54,38	50,28	52,33
300	1,592	0,995	48	45,55	50,82	48,185
400	1,274	1,225	39,5	40,96	39,53	40,245
Коэффициент R корреляции расчета HRC с экспериментом				0,982	0,972	0,998
СКО между расчетом и измерением HRC, ед. HRC, %				1,204	1,314	0,493
				2,52%	2,55%	1,00%

Существует метод [1–3], при котором контролируемое изделие колеблется как одно целое, вернее колеблются одни части тела относительно других. Ряд физических характеристик тела может быть определен по параметрам возбуждаемых колебаний. В большинстве случаев на практике частоты собственных колебаний тел лежат в звуковом диапазоне и лишь только некоторые частоты близки к 20 кГц.

Современные компьютеризированные дефектоскопы, основанные на разных физических принципах, часто позволяют с большой точностью определить координаты и размеры дефектов, но вот определение влияния даже трёх произвольно расположенных дефектов на несущую способность конструкции, находящейся в сложнапряжённом состоянии часто представляет собой трудноразрешимую проблему с большим количеством допущений, сводящим к нулю все преимущества высокоточного определения координат и размеров дефектов. Кроме этого, дефектоскопы калибруются по стандартным образцам (СО), где поры и пустоты имитируются сверлениями, трещины – надрезами и т. д. Влияние сверления в монолитном материале с известным модулем упругости и поры, образовавшейся в результате (например, в случае композиционных материалов) недопрессовки или перепрессовки и окруженной монолитным, но дефектным материалом, пористым, с нарушенным соотношением компонентов, на несущую способность изделия в целом совершенно разное. Аналогично, влияние трещины на ослабленном участке материала, с нулевым радиусом при вершине, являющейся концентратором напряжений и надпила с одинаковой длиной, но с радиусом при вершине 1...3 мм в монолитном материале несопоставимы. Понятно, что это может приводить на практике к большим ошибкам, недобраковкам и перебраковкам, в определении несущей способности изделий.

Рассматриваемый метод и математическое обоснование его реализации свободны от этих недостатков трактовки результатов, так как позволяют, минуя стадию поиска дефектов, сразу определять их влияние на несущую способность конструкции. Метод особенно хорош в тех случаях, когда требуется отобрать из партии лучшие или худшие изделия, или изделия по качеству сопоставимые с эталоном.

Известно [2, 3], что в общем виде взаимосвязь ЧСК изделий со скоростью распространения акустических волн в материале, из которого они изготовлены, может быть представлена в виде

$$f_i = F_i \cdot C_l, \quad (1)$$

где f_i – частота собственных колебаний определенного вида i ; F_i – коэффициент формы, зависящий от формы и размеров изделий, коэффициента Пуассона, а также от вида возбуждаемых колебаний i ; C_l – приведенная скорость распространения акустических волн, $C_l = \sqrt{E/\rho}$

(определение по ГОСТ 25961–83 и ГОСТ Р 52710–2007) – скорость распространения упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, изготовленном из такого же материала, что и материал контролируемого объекта; E – модуль нормальной упругости (модуль Юнга); ρ – плотность материала изделия.

Из выражения (1) следует, что при одинаковой форме и размерах изделий частота f_i , соответствующая определенному виду (моду) колебаний, характеризует приведенную скорость распространения акустических волн C_i . Этот параметр является упругой константой материала изделия, связанной с модулем Юнга, плотностью, прочностью, пористостью, твердостью и другими физико-механическими свойствами материала, а также с наличием дефектов или нарушением структуры материала изделия. С другой стороны, при одинаковых значениях скорости C_i частота f_i может изменяться при изменении коэффициента формы F_i , которое может быть вызвано как изменением геометрических размеров, так и влиянием достаточно крупных дефектов. Таким образом, в любом случае изменение частоты f_i определенной моды колебаний означает либо изменение физико-механических свойств материала изделия, либо наличие в нем дефектов. При этом и ухудшение физико-механических свойств материала (уменьшение прочности, твердости и т. п.) и наличие дефектов обычно приводят к понижению значения ЧСК.

Основные области, в которых уже нашел применение описанный метод контроля для решения практических задач:

- контроль шлифовального инструмента на всех видах связей, в том числе фасонного (профилированного, с выточками), отрезных кругов любого диаметра, а также малогабаритных инструментов диаметром 8 мм и менее, для определения физико-механических свойств которого не могут быть использованы традиционные методы контроля твердости;
- контроль огнеупорных изделий;
- контроль углеграфитовых изделий;
- контроль отливок из чугуна и других металлов;
- контроль изделий из высокопрочной керамики, в том числе ситаллов и синтетических сверхтвердых материалов;
- контроль частот собственных колебаний турбинных лопаток;
- контроль строительных изделий и диагностика состояния зданий, сооружений и других строительных конструкций;
- определение упругих констант (модулей упругости, коэффициента Пуассона и др.) материала изделий различной формы, изготовленных из различных материалов.

В настоящее время метод контроля, основанный на измерении ЧСК, начинает находить применение также и для решения задач дефектоскопии различного рода литья [4], для контроля состояния деревянных опор линий

Анализ рисунка и формулы (8) показал, что значения $\bar{\sigma}_F < 1$ не могут быть достигнуты ни при каких R , если $\bar{\sigma}_2 \geq 3$. В этих случаях применение двухпараметрового метода ни при каких условиях не обеспечит снижение СКО величины F по сравнению с однопараметровым. При $1 \leq \bar{\sigma}_2 < 3$ величина $\bar{\sigma}_F$ снижается по мере уменьшения $\bar{\sigma}_2$ и приближении R к -1.

Достижимым является примерно четырехкратное ($\bar{\sigma}_F \approx 0,25$) снижение СКО $\bar{\sigma}_F$ двухпараметрового измерения величины F ; для этого необходимо одновременное выполнение условий $R < -0,9$ и $0,7 \leq \bar{\sigma}_2 < 1,3$.

В качестве примера результаты проведенного анализа подтверждены снижением погрешности определения временного сопротивления разрыву σ_B стали 40X, подвергнутой отпуску после закалки, по результатам измерения ее остаточной намагниченности M_r и коэрцитивной силы H_c по сравнению с использованием любого из этих параметров (табл. 1). В таблице использованы значения σ_B стали 40X после разных температур T_o отпуска [12]. Для анализа использованы и результаты измерения B_r и H_c стали 40X [4, табл. 26.2]. Коэффициент R корреляции между M_r и H_c по данным таблицы составил -0,633. Магнитные параметры B_r и H_c , приведенные в [4], измерены по стандартным методикам ГОСТ 8.377–80. Относительная погрешность их измерения не превышает соответственно ± 3 и ± 2 %.

Табл. 1. Результаты измерения временного сопротивления σ_B , коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r стали 40X, отпущенной при разных температурах T_o отпуска после закалки, и результаты расчета σ_B по разным формулам

T_o , °C	Результаты измерения в [4, 12]			Результаты расчета σ_B		
	H_c , А/м	M_r , кА/м	σ_B , МПа	по (9)	по (10)	по (3), (9) + (10)
200	2650	875	1760	1850,5	1603,7	1727,2
300	1490	883	1610	1349,5	1588,0	1468,8
400	1320	915	1320	1244,1	1525,1	1384,7
500	1150	1186	1150	1124,2	992,6	1058,4
600	1160	1186	860	1131,7	992,6	1062,2
Коэффициент R корреляции между результатами расчета и измерения σ_B				0,791	- 0,888	0,936
СКО между расчетом и измерением σ_B , МПа (%)				144,9 (12,1 %)	134,7 (11,0 %)	106,5 (9,4 %)

Статистическая обработка корреляционных связей между M_r и σ_B , H_c и σ_B и построение линий тренда этих зависимостей проведены по процедуре программы Microsoft Excel. Получены следующие уравнения для определения временного сопротивления σ_B стали 40X по результатам измерения их M_r и H_c :

момент, $K_{x_1x_2} = R\sigma_1\sigma_2$; σ_1 и σ_2 – средние квадратические отклонения величин x_1 и x_2 ; R – коэффициент корреляции между ними.

Из (4) СКО σ_Σ суммы величин x_1 и x_2 [11]

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + 2R\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (5)$$

С учетом (5) и (3) получим для СКО σ_F косвенного определения физической величины F по уравнению (3) аналитическое выражение

$$\sigma_F = 0,5\sqrt{\sigma_1^2 + 2R\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (6)$$

Для обобщения анализа введем относительные величины:

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2/\sigma_1 \text{ и } \bar{\sigma}_F = \sigma_F/\sigma_1. \quad (7)$$

Величина $\bar{\sigma}_F$ показывает, как использование второго параметра x_2 для определения величины F изменяет СКО ее определения по (3) по сравнению с использованием только параметра x_1 . Из (6) и (7) получим

$$\bar{\sigma}_F = 0,5\sqrt{1 + 2R\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_2^2}. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета по формуле (8) зависимостей $\bar{\sigma}_F = \bar{\sigma}_F(\bar{\sigma}_2)$ при разных значениях диапазона $-1 \leq R \leq 1$ изменения коэффициента R корреляции между параметрами x_1 и x_2 .

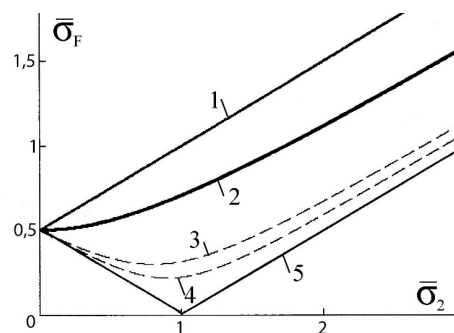


Рис. 1. Зависимость относительного средноквадратического отклонения $\bar{\sigma}_F$ результатов определения физической величины F от относительного СКО $\bar{\sigma}_2$ второго параметра: 1 – 5 – соответственно при $R = 1; 0; -0,8; -0,9; -1$. Расчет по формуле (8)

электропередач (ЛЭП) [5], для определения плотности древесины при оперативном таможенном контроле, для контроля трещиноватости гранитных блоков [6], для контроля изделий, используемых на железнодорожном транспорте (ж.-д. колеса и оси, подвесная арматура контактной сети и т. п.).

При использовании акустических методов контроля, основанных на измерении ЧСК изделий, требуется разработка специальных методик контроля, учитывающих форму и размеры изделий. Такие методики были, в первую очередь, разработаны применительно к контролю абразивных изделий для большинства типоразмеров шлифовальных инструментов на всех видах связей (керамических, бакелитовых, вулканиковых). В России применение разработанных методик для контроля основных типоразмеров абразивных инструментов регламентировано ГОСТ Р 52710–2007 *Инструмент абразивный. Акустический метод контроля твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн* (ранее ГОСТ 25961–83 (СТ СЭВ 3313–81) *Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств* [7]). В соответствии с указанным стандартом рекомендовано использование для измерения ЧСК приборов типа «Звук» или других приборов с аналогичными техническими характеристиками.

В настоящее время в отечественной промышленности наиболее широкое применение находят измерители частот собственных колебаний типа «Звук» различных модификаций, выпускаемые ООО «ЗВУК» (г. Санкт-Петербург), приборы типа ИЧСК-1, ИЧСК-2, выпускаемые НПП «Интерприбор» (г. Челябинск); из зарубежных аналогичных приборов наибольшее применение для производственного контроля находят приборы типа «GrindoSonic», выпускаемые фирмой «Lemmens Electronika» (Бельгия). Различные модификации приборов типа «Звук» включают приборы, действие которых основано на использовании как метода свободных, так и метода вынужденных колебаний.

На использовании **метода свободных колебаний** основано действие прибора «Звук-203М» (рис. 1), реализующего патент России № 2151385. Частотный диапазон прибора от 22 Гц до 17,4 кГц позволяет контролировать изделия в широком диапазоне размеров, приблизительно от 20...50 см до нескольких метров. Колебания в изделии возбуждаются ударом с помощью молотка или специального ударника, а в качестве приемника колебаний используется встроенный в корпус прибора микрофон. Возможно подключение внешнего микрофона или пьезоэлектрического датчика. Предусмотрена также возможность подключения прибора к компьютеру, что при разработке специализированных под конкретное изделие программ дополнительно расширяет возможности его использования. Основное отличие прибора «Звук-203М» от упомянутого зарубежного прибора «GrindoSonic», использующего этот же метод

измерения, состоит в том, что в приборе имеются полосовые фильтры, с помощью которых возможно выделять не только основной тон, но и более высокие ЧСК изделия.

Метод вынужденных колебаний (резонансный метод) реализован в приборе «Звук-130» (рис. 2). Частотный диапазон прибора от 0,5 до 500 кГц позволяет контролировать малогабаритные изделия с размерами от 3 мм и даже менее, в том числе такие, контроль физико-механических свойств которых в настоящее время никакими другими методами не производится.



Рис. 1. Прибор «Звук-203М»

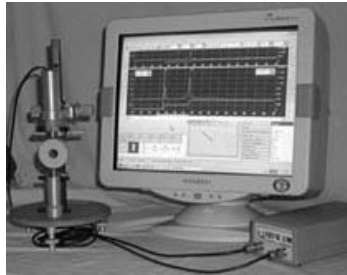


Рис. 2. Прибор «Звук-130»

Контролируемое изделие закрепляется в измерительной стойке между двумя пьезоэлектрическими преобразователями, снабженными куполообразными насадками для уменьшения влияния приемно-излучающей системы на колебания изделия (патент Германии № 1648770, патент США № 3499318, патент Англии № 1153241, патент Франции № 1527366). Электронная часть прибора, включающая генератор переменной частоты и широкополосный усилитель, выполнены в виде отдельного блока, подключаемого к компьютеру. Работой прибора управляет специальная программа, по которой производится расчет ожидаемого спектра ЧСК контролируемого изделия и выбор условий измерения для конкретных типоразмеров изделий различных форм и размеров. Результаты контроля выводятся на экран монитора в графическом и цифровом виде (рис. 3).

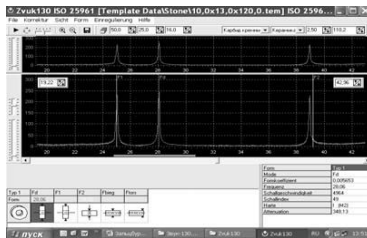


Рис. 3. Результаты контроля на экране монитора прибора «Звук-130»

эти свойства (каждое по-своему) определяются структурой металла, формируемой при термических обработках [1]. Эти зависимости подвержены влиянию случайных факторов. Поэтому связи между механическими и магнитными свойствами сталей [2–4] имеют корреляционный характер. На коэффициент R корреляции между результатами прямых и косвенных измерений физико-механических свойств сталей и погрешность их определения влияют диапазон изменения и погрешности измерения магнитных параметров [5]. Некоторые параметры практически не пригодны для использования в неразрушающем контроле из-за высокой методической погрешности измерения [6–8]. Повышения R и снижения погрешности контроля твердости стальных труб в промышленных условиях удалось добиться двухпараметровым методом по коэрцитивной силе H_c и остаточной индукции B_r (прибор [9], реализующий методику, создает замкнутую магнитную цепь, так как измерение B_r в разомкнутой магнитной цепи невозможно [10]). Но оптимальные условия применения двухпараметрового метода не установлены. Это сдерживает эффективное применение методов магнитного структурного анализа.

Цель работы – определение и обоснование условий повышения достоверности двухпараметрового косвенного измерения физико-механических свойств сталей по сравнению с однопараметровым.

Пусть установлено, что величина F (твердость HRC стали или другое ее физико-механическое свойство) может быть определена по измерениям корреляционно связанных с ней параметров x_1 и x_2 по зависимостям

$$F(x_1) = \varphi_1(x_1); \quad (1)$$

$$F(x_2) = \varphi_2(x_2). \quad (2)$$

При этом средние квадратические отклонения результатов определения величины F по уравнениям (1) и (2) от ее истинных значений составляют σ_1 и σ_2 , а параметры x_1 и x_2 корреляционно связаны друг с другом с коэффициентом корреляции R ($-1 \leq R \leq 1$). Рассчитаем величину F как среднее арифметическое ее определения по формулам (1) и (2):

$$F(x_1, x_2) = 0,5 \cdot [\varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2)]. \quad (3)$$

Из теории вероятностей известно, что дисперсия $D(x_1 + x_2)$ суммы двух случайных величин x_1 и x_2 в общем случае [11]

$$D(x_1 + x_2) = D(x_1) + D(x_2) + 2K_{x_1x_2} \quad (4)$$

где $D(x_1)$ – дисперсия x_1 ; $D(x_2)$ – дисперсия x_2 ; $K_{x_1x_2}$ – их корреляционный

УДК 53.088 : 620.179.14

УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ДВУХПАРАМЕТРОВОГО КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПО СРАВНЕНИЮ С ОДНОПАРАМЕТРОВЫМ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 53.088 : 620.179.14

CONDITIONS OF INCREASING DEPENDENCE OF TWO-PARAMETER INDIRECT MEASUREMENT OF PROPERTIES OF STEELS COMPARED TO ONE-PARAMETER **S. G. SANDOMIRSKI**

Аннотация. Исследовано среднее квадратичное отклонение (СКО) σ_F косвенного определения физической величины с использованием двух параметров x_1 и x_2 , корреляционно связанных с ней. Показано, что снижение σ_F проявляется при обратной корреляционной связи между x_1 и x_2 с максимальным модулем коэффициента корреляции между ними. Наиболее существенное снижение σ_F имеет место при близких величинах СКО σ_1 и σ_2 между истинными значениями физической величины и значениями, рассчитанными по результатам ее косвенных измерений с использованием каждого из параметров x_1 и x_2 . Результаты анализа подтверждены примерами снижения СКО определения временного сопротивления стали 40X и твердости HRC стали 45 по результатам измерения их коэрцитивной силы H_c и остаточной намагниченности M_r по сравнению с использованием любого из этих параметров. Область применения результата – неразрушающий контроль физико-механических свойств изделий.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, временное сопротивление, твердость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, погрешность измерения.

Abstract. The mean square deviation σ_F of the indirect determination of a physical quantity using two parameters x_1 and x_2 correlated with it was studied. It was shown that a decrease in σ_F manifests itself in the inverse correlation relationship between x_1 and x_2 with the maximum modulus of the correlation coefficient between them. The most significant decrease in σ_F occurs at close values of the mean square deviation σ_1 and σ_2 between the true values of the physical quantity and the values calculated from the results of its indirect measurements using each of the parameters x_1 and x_2 . The results of the analysis are confirmed by examples of decreasing mean square deviation determining the temporary resistance of steel 40X and the hardness HRC of steel 45 by measuring their coercive force H_c and residual magnetization M_r compared to using any of these parameters. The scope of the result is non-destructive testing of the physical and mechanical properties of products.

Key words: non-destructive testing, tensile strength, hardness, coercive force, remanent magnetization, measurement error.

Измерения физико-механических свойств материалов в магнитном структурном анализе являются косвенными. Физическая основа связей между физико-механическими и магнитными свойствами сталей в том, что

Наиболее широко используемые в настоящее время в отечественной промышленности специализированные измерители частот собственных колебаний типа «Звук» сочетают требование простоты и надежности с достаточно высокой точностью измерения ЧСК. Разработано также специальное программное обеспечение, необходимое для расчета упругих констант и анализа спектра ЧСК при контроле изделий различных форм и размеров. Комплект приборов «Звук» типа «Звук-130» и «Звук-203М» обеспечивает возможность проведения анализа спектра ЧСК как крупногабаритных заготовок и изделий, так и изделий весьма малых размеров непосредственно в условиях их производства и эксплуатации.

Совместными работами с фирмой «Абразив» (Чехия) был выполнен комплекс работ, позволивших применить этот метод и приборы «Звук» для его реализации не только в отечественной промышленности, но и на ряде зарубежных фирм в таких развитых странах, как Австрия, Германия, Индия, Италия, Китай, Польша, США, Чехия, Швейцария и др., не только для контроля абразивных инструментов, но и изделий из других материалов [8].

Специалистами фирмы «Гранит» (Венгрия) был выполнен значительный комплекс работ по освоению акустического метода контроля физико-механических свойств и качества абразивных изделий, который позволил включить этот метод в государственный стандарт Венгрии MSZ 4505/9-83. Венгерскими специалистами было подтверждено, что этот метод позволяет производить расшифровку низкочастотного спектра собственных колебаний мелкогабаритного абразивного инструмента и дает возможность проведения серийных акустических испытаний абразивного инструмента с учетом влияния основных рецептурно-технологических факторов, при этом акустический параметр C_l шлифовальных инструментов хорошо отражает изменение плотности ρ шлифовального круга. Изготовленные из заданной рецептурной смеси инструменты характеризуются имеющейся между этими двумя параметрами C_l и ρ зависимостью общего характера, причем проведенные венгерскими специалистами эксперименты подтвердили, что у инструментов, изготовленных из заданной рецептурной смеси эта зависимость линейная.

Выполненные совместные работы позволили также провести освоение акустического метода контроля в условиях производства фирмы «Дрезден Унион» (Германия), причем в Германии применение метода было регламентировано государственным стандартом ГДР TGL 55047.

В Чехословакии на фирме «Карборундум электрит» этот метод был включен в технологический процесс производства абразивного инструмента с использованием специально разработанного программного обеспечения.

В приборах типа «Звук» предусмотрено получение конечного результата измерений в следующих формах: ЧСК (f), скорость звука (C_l), модуль Юнга (E). Возможно также получение других физико-механических

характеристик изделий при условии введения соответствующих корреляционных зависимостей. Для удобства эксплуатации приборов в промышленных условиях и осуществления сортировки контролируемых изделий предусмотрено также получение результата в виде так называемых звуковых индексов (ЗИ) – градаций скорости звука C_l с определенным шагом. ЗИ обозначается нечетным двухзначным числом, умножение которого на 100 дает среднее для данной градации значение скорости звука C_l , м/с. Звуковой индекс, по сути дела, может рассматриваться в качестве меры физико-механических свойств различных материалов. Этот параметр нашел достаточно широкое применение для оценки и контроля физико-механических свойств различного рода абразивных изделий в соответствии с упомянутым стандартом ГОСТ Р 52710–2007 (ранее ГОСТ 25961–83). Использование пронормированной в виде звукового индекса ЗИ величины C_l в качестве выходного параметра при акустическом контроле позволяет производить определение и контроль физико-механических свойств изделий как при их изготовлении, так и в условиях их эксплуатации. Для обозначения ЗИ в соответствии с упомянутым стандартом используются нечетные числа от 19 до 75, охватывающие диапазон C_l от 1800 до 7500 м/с. Этот диапазон позволяет оценивать физико-механические свойства практически всех основных выпускаемых в настоящее время абразивных инструментов, начиная с самых мягких кругов на вулканических связках, вплоть до самых твердых кругов на керамических связках, используемых для обработки шариков в подшипниковой промышленности. При необходимости, диапазон значений ЗИ может быть расширен, так, например, режущим инструментам из композиционных материалов, полученным на базе кубического нитрида бора, соответствуют ЗИ 109–155, в то же время ЗИ менее 19 имеют, например, гибкие порошковые круги. Следует отметить, что звуковой индекс является высокоинформативным параметром и в ряде случаев позволяет оценивать физико-механические свойства самых разнообразных изделий не только из абразивных, но и из других видов материалов. Значения ЗИ и C_l некоторых твердых и сверхтвердых материалов, определенные акустическим методом с применением приборов типа «Звук», приведены в табл. 1. Там же для сравнения приведены значения Е-модуля и микротвердости этих материалов, взятые из справочной литературы. Как видно из табл. 1, с уменьшением скорости C_l и, соответственно, ЗИ уменьшается и микротвердость, являющаяся одной из основных характеристик материалов подобного рода. Для модуля упругости, который в ряде случаев используется для оценки физико-механических свойств подобных материалов, во всем диапазоне рассмотренных материалов такой зависимости не наблюдается. Это позволяет рассматривать звуковой индекс в качестве дополнительной меры, характеризующей физико-механические свойства подобных материалов.

6. **Сандомирский, С. Г.** Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (обзор) / С. Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 1. – С. 40–46.

7. **Сандомирский, С. Г.** Выбор величины намагничивающего поля при магнитоструктурном анализе ферромагнитных изделий / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1991. – № 7. – С. 42–48.

8. Способ контроля механических свойств движущегося стального изделия, подвергнутого отпуску после закалки: пат. ВУ 20075 / С. Г. Сандомирский. – Оpubл. 2016.

9. **Клюев, В. В.** Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – Москва: СПЕКТР, 2017. – 248 с.

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

В докладе приведены результаты промышленного использования приборов МАКСИ-2 и разработанной методики для контроля твердости болтов из стали 30ХГСА, предназначенных для использования в самолетостроении, болтов и других изделий из стали 40Х, использованных в дизельных двигателях. Исследования показали, что зависимость твердости HRC болтов от Φ_d в болтах после их частичного размагничивания по оптимальному режиму практически линейна.

Выводы

Для неразрушающего контроля качества термической обработки и твердости крепежных изделий ответственного назначения, используемых в автомобильной и авиационной технике, необходимо измерять остаточный магнитный поток Φ_d , сохраняющийся в изделиях после их намагничивания до технического насыщения и размагничивания полем оптимальной напряженности. Разработанные методика и прибор магнитного контроля механических свойств ответственных изделий массового производства из среднеуглеродистых легированных сталей гарантируют качество каждого изделия, повышают надежность продукции, в которую они установлены.

Использование приборов МАКСИ-2 на машиностроительном и авиационном промышленных предприятиях для контроля твердости болтов из сталей 40Х и 30ХГСА показало, что частичное размагничивание изделий из среднеуглеродистых сталей и последующее измерение Φ_d в них позволяют устранить неоднозначность связи Φ_d с температурой T_0 отпуска таких изделий. Сопоставление с аналогами показало превосходство приборов МАКСИ-2 по функциональным и техническим возможностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
2. **Сандомирский, С. Г.** Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2013. – № 2. – С. 57–60.
3. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / К. В. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 3–11.
4. **Сандомирский, С. Г.** Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1996. – № 7. – С. 24–46.
5. **Сандомирский, С. Г.** Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. / С. Г. Сандомирский. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 244 с.

Табл. 1

Материал или изделие	Е-модуль, $10^3 \cdot \text{кгс/мм}^2$	Скорость распространения упругих колебаний C_l , $10^3 \cdot \text{м/с}$	Звуковой индекс	Микро-твердость Н, кгс/мм^2
Алмаз	50,2...85,0	15,7...15,9	157...159	10000
Эльбор	62,0...95,0	12,0...15,6	125...157	9000
Карбид бора	29,6	10,8	107...109	3700...4300
Карбид кремния	36,5	10,6	105...107	3000...3300
Материалы С2, С8 на основе карбида кремния	34,5...41,0	10,9...11,6	109...117	–
Термоторунд	35,5...41,0	9,6...10,2	95...103	2000...2400
Минералокерамика горячего прессования	40,5...44,5	10,0...10,5	99...105	–
Карбид вольфрама	72,2	6,7	67	1730
Быстрорежущая сталь Р18	22,0	5,0	49...51	1300...1400

При введении в качестве выходного параметра контроля C_l и соответствующих значений ЗИ, как следует из выражения (1), должны быть стандартизованы вид колебаний, собственная частота которых подлежит измерению при контроле, и соответствующий этому виду колебаний коэффициент формы F_i , зависящий от размеров и формы изделий и незначительно от коэффициента Пуассона, который с достаточной степенью точности может быть принят постоянным, например, для большинства видов абразивных изделий. При использовании акустического метода для контроля абразивных изделий типа шлифовальных кругов прямого профиля, отрезные и обдирочные круги, бруски и сегменты наиболее широкое распространение находят пять основных видов колебаний, для коэффициентов формы которых получены аналитические зависимости, учитывающие влияние размеров и формы изделий [2].

Для изделий более сложной формы, включая различного рода головки, круги в форме чашек и тарелок, профилированные круги и т. п., коэффициенты формы определяются по специальным методикам с проведением при необходимости дополнительных экспериментальных исследований.

Указанные методы и приборы нашли достаточно широкое применение для определения физико-механических свойств различных материалов и изделий, входного и выходного контроля, оценки стабильности

технологического процесса изготовления различных изделий, подбора комплектов изделий с одинаковыми или специально заданными свойствами, мониторинга состояния изделий при эксплуатации в циклических режимах и т. п. [3]. Порядок применения метода в различных областях регламентируется как стандартами, так и отдельными специально разработанными методиками контроля.

Возможность **определения упругих констант материалов** таких как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и других параметров, характеризующих упругие свойства различных материалов по результатам измерения ЧСК, представляет большой интерес при определении и исследовании свойств новых сверхтвердых и композиционных материалов, особенно в том случае, когда размеры или структура образцов не позволяют использовать известные разрушающие и неразрушающие методы контроля для определения указанных параметров. Наличие алгоритмов контроля и возможность получения высокой точности измерения отдельных составляющих спектра ЧСК позволяют использовать для анализа спектра непосредственно приборы типа «Звук» различных модификаций или другие аналогичные устройства.

Дефектоскопия изделий. Акустический контроль, основанный на измерении ЧСК, дает интегральную оценку всего объема изделия, однако, как было сказано выше и следует из выражения (1), при одинаковых значениях скорости C_1 частота f_i может изменяться при изменении коэффициента формы F_i , которое может быть вызвано как изменением геометрических размеров, так и влиянием крупных дефектов. Таким образом, в любом случае изменение частоты f_i определенной моды колебаний означает либо изменение физико-механических свойств материала изделия, либо наличие в нем дефектов. При этом и ухудшение физико-механических свойств материала (уменьшение прочности, твердости и т. п.), и наличие дефектов обычно приводят к понижению значения ЧСК. Как следует из формулы (1), можно разделить влияние на значения ЧСК физико-механических свойств материала контролируемого изделия и его геометрии, для чего необходимо рассматривать не только само значение ЧСК, но и отношение частот собственных колебаний двух различных мод «i» и «k», которое не зависит от скорости C_1 и определяется только геометрическими факторами, в том числе наличием дефектов:

$$\frac{f_i}{f_k} = \frac{F_i}{F_k}. \quad (2)$$

При одинаковых геометрических размерах выражение (2) фактически описывает изменение спектра ЧСК изделия при наличии в нем дефектов. При реализации метода, основанного на измерении ЧСК, для целей дефектоскопии необходимо разрабатывать специальные методики

измерения Φ_d прибором МАКСИ-2 в интервале допустимых воздействий не превышает 1,5 %.

Совершенствование методики контроля. Разработанная методика [8] позволяет выбрать величину H_p , при которой достигается оптимальная чувствительность к изменениям T_o при контроле изделий конкретных размеров. Достоверность контроля физико-механических свойств изделий из среднеуглеродистых сталей, подвергнутых закалке и отпуску, повышается за счет того, что установленная напряженность H_p размагничивающего поля обеспечивает максимально возможную чувствительность остаточной намагниченности M_{r1} и связанных с ней магнитных параметров (например, остаточного магнитного потока Φ_{d1}) в изделиях из среднеуглеродистых сталей к изменению температуры их средне- и высокотемпературного отпуска.

В подтверждение этого на рис. 3 представлена зависимость коэффициента R корреляции в линейных уравнениях регрессии между твердостью HRC изделий «Шпилька № 50-003112» из стали 40X и остаточным магнитным потоком Φ_{d1} в этих изделиях после намагничивания до технического насыщения и размагничивания магнитными полями H_p разной напряженности от отношения остаточного магнитного потока Φ_d в закаленном изделии «Шпилька», намагниченном до технического насыщения, к остаточному магнитному потоку Φ_{d1} в этом изделии, размагниченном после намагничивания до технического насыщения полями той же напряженности H_p .

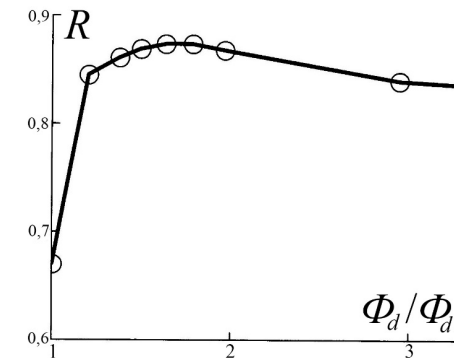


Рис. 3. Зависимость коэффициента R корреляции между твердостью HRC изделий «Шпилька» из стали 40X и остаточным магнитным потоком Φ_{d1} в этих изделиях после размагничивания полями разной напряженности от отношения Φ_d / Φ_{d1}

В [9] показано, что такой контроль основан на чувствительности M_d в изделии после его перемагничивания до определенных значений внешнего поля к остаточной намагниченности M_r материала изделия.

Для контроля качества отпуска изделий из среднеуглеродистых сталей в движении разработан прибор МАКСИ-2 [4, 6] (рис. 2), в котором изделия после намагничивания магнитным полем нужной напряженности [7] и перед измерением остаточной намагниченности в них подвергают дозированному действию размагничивающего поля напряженностью H_p .

Прибор содержит (см. рис. 2, а): направляющую 1; намагничивающую катушку 2; компенсирующие 3 и размагничивающие 5 системы катушек; источники намагничивающего 4 и размагничивающего 6 тока; измерительные преобразователи 7, 8; измерительные каналы 9, 10; блоки цифровых компараторов 11 и разбраковки 12; контролируемые изделия 14. На пути движения изделий созданы локальные области с намагничивающим H_m и размагничивающим H_d полями заданной напряженности (на рис. 2, б: 1 – поле H_d выключено; 2 – напряженность H_d размагничивающего поля максимальна).

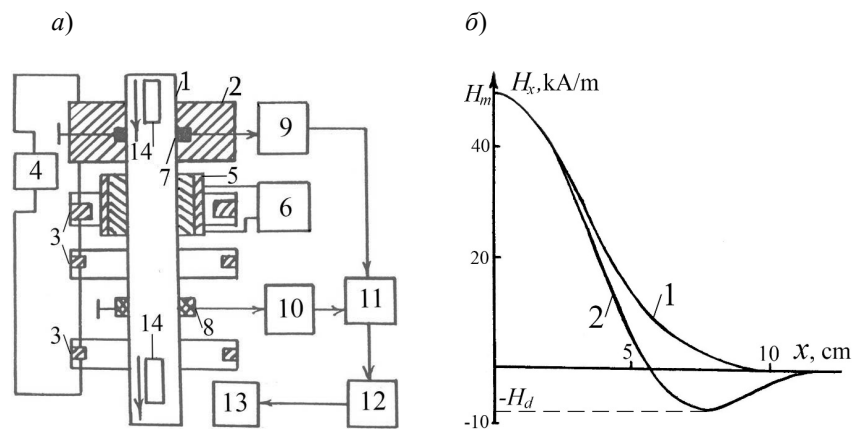


Рис. 2. Функциональная схема (а) прибора МАКСИ-2 и распределение (б) магнитного поля H_x вдоль оси x движения изделий

Конструкции намагничивающих и размагничивающих катушек и структурные схемы измерительных каналов защищены несколькими патентами на изобретения. Используемые технические решения создают условия, при которых размагничивающее поле не влияет на изделие при его движении сквозь индукционные преобразователи. Исключено и влияние скорости движения изделий на результаты контроля. Метрологическая аттестация приборов МАКСИ-2 основана на создании в преобразователе заданного изменения магнитного потока путем перемещения сквозь него соленоида – «меры магнитного потока» [6]. Аттестацией в Белорусском центре стандартизации и метрологии установлено, что погрешность

контроля, обеспечивающие надежное выделение из спектра ЧСК соответствующих выбранных для контроля видов (мод) колебаний и исключаящих влияние на результаты измерений формы и размеров изделий и образцов. Обычно наличие нарушений сплошности структуры изделия и наличие в нем дефектов, как было указано выше, приводит к понижению ЧСК и соответствующего значения S_i ниже некоторого заранее определенного значения и к изменению спектра ЧСК, т. е. изменению соотношения между ЧСК разных видов колебаний. Эти обстоятельства в ряде случаев позволяют обнаруживать различного рода нарушения сплошности, в первую очередь трещины, и неоднородности.

Специалистами ООО «ЗВУК» и кафедры приборостроения Горного университета (г. Санкт-Петербург), был разработан проект целевой научно-технической программы «Неразрушающий контроль качества и диагностика огнеупорных материалов и изделий», который может быть использован при дальнейшем освоении акустического метода контроля физико-механических свойств и качества огнеупоров, а также был разработан аналогичный указанному выше проект целевой научно-технической программы «Разработка рекомендаций по освоению неразрушающих методов контроля физико-механических свойств и качества изделий из углеродных материалов», который может быть использован при дальнейшем освоении акустического метода контроля физико-механических свойств и качества углеродных и углеграфитовых изделий.

При проведении дополнительных научно-исследовательских работ области применения метода могут быть существенно расширены как в направлении контроля физико-механических свойств различного рода материалов и изделий, так и в направлении дефектоскопии изделий и определения состояния и остаточного ресурса различного рода конструкций, зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающие испытания: справочник: пер. с англ. / Под ред. Р. Мак-Мастера. – Москва; Ленинград: Энергия, 1965. – Кн. 2. – С. 418–426.
2. Глаговский, Б. А. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении / Б. А. Глаговский, И. Б. Московенко. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 206 с.
3. Коварская, Е. З. Опыт промышленного использования акустического метода оценки физико-механических свойств изделий по частотам собственных колебаний / Е. З. Коварская, И. Б. Московенко // Дефектоскопия. – 1991. – № 6. – С. 9–15.
4. Коварская, Е. З. Определение прочности и твердости отливок из чугуна методом свободных колебаний / Е. З. Коварская, А. К. Голдобин,

А. В. Антонов // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – № 4 (58). – С. 20–24.

5. Устройство для звукового контроля деревянных опор: пат. RU 85238 / И. Б. Московенко, В. В. Гаврилов, Е. З. Коварская, О. А. Кононов, И. Я. Лиманов. – Оpubл. 27.07.2009.

6. **Павлов, И. В.** К вопросу неразрушающего контроля трещин в горных породах, ведущих к разрушению каменных изделий в процессе хранения, транспортировки и применения. Строительный камень от геологии до архитектуры / И. В. Павлов, Н. А. Кутин, Н. А. Ирканаева. – Петрозаводск, 2015. – С. 151–159.

7. **ГОСТ 25961–83 (СТ СЭВ 3313–81).** Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 16 с.

8. Natural oscillation frequencies measuring and test of articles and materials / E. Kovarskaya, I. Moskovento, L. Slavina, M. Zima, L. Rekhson // The 15-th international DAAAM Symposium. – Vienna, Austria, 3–6-th November 2004. – S. 261–262.

Магнитный контроль качества термической обработки и механических свойств изделий из среднеуглеродистых сталей имеет свои особенности. Это незначительное или немонотонное изменение H_c с увеличением температуры T_o отпуска закаленных изделий. Зависимости магнитных свойств и твердости HRC по Роквеллу сталей 40X и 30XГСА от температуры закалки и отпуска наиболее полно представлены в [1]. На рис. 1 приведены зависимости H_c и M_{Hr} сталей 40X и 30XГСА от их HRC.

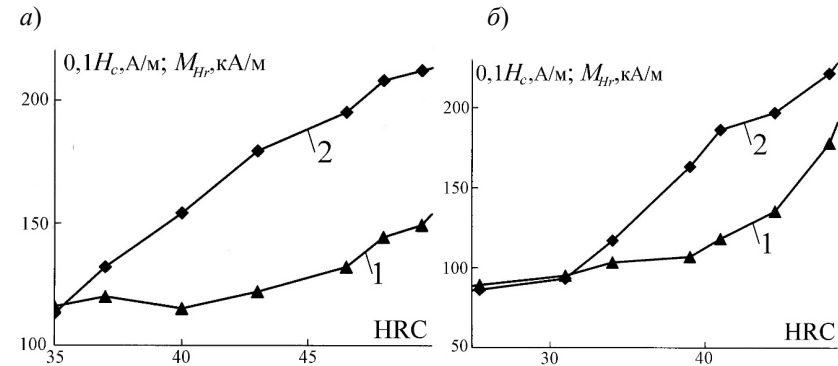


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы H_c (1) и релаксационной намагниченности M_{Hr} (2) сталей 40X (а) и 30XГСА (б) от их твердости HRC по данным [1]

Выбор измеряемого магнитного параметра и методики контроля. Зависимости рис. 1 показывают, что H_c сталей 40X и 30XГСА в практически важном диапазоне изменения ее температуры отпуска ($400^\circ\text{C} \leq T_t \leq 600^\circ\text{C}$) и твердости ($30 \leq HRC \leq 42$) изменяется неоднозначно или не значительно. Релаксационная намагниченность M_{Hr} этих сталей изменяется при этом однозначно и в 3 раза больше, чем H_c . Но при стандартных требованиях к измерительной аппаратуре погрешность измерения M_{Hr} в важном диапазоне изменения свойств сталей достигает десятков процентов и более [2], а измерение M_{Hr} трудоемко и не поддается автоматизации [3].

Индивидуальный характер использования изделий в ответственных узлах обуславливает необходимость автоматизированного контроля каждого изделия. При контроле массовых партий изделий лучшие по достоверности и производительности результаты обеспечивает намагничивание изделий при падении сквозь катушку с постоянным током и измерение остаточного магнитного потока Φ_d в изделии [4]. При этом Φ_d в изделиях пропорционален не M_r , а H_c материала изделий [5].

products, the best results in terms of performance and reliability ensure magnetization of products falling through a direct current coil and measuring the residual magnetic flux Φ_d in the product. Moreover, Φ_d in the products is not proportional to the residual magnetization M_r , but to the coercive force H_c of the product material. But a feature of steels with a carbon content of more than 0,3 % is a non-monotonic change in H_c with an increase in the temperature T_t of tempering tempered products. To control the tempering regime of such products, it was proposed that magnetized products be measured prior to measuring Φ_d to be demagnetized by a field H_p . The developed technique allows us to choose H_p , at which optimal sensitivity to changes of T_t is achieved. It is shown that such control is based on the sensitivity of Φ_d in the product after its magnetization reversal by the field H_p to M_r of the product material. The created technical means provide industrial application of the technique for controlling the hardness of bolts made of 37Cr4 and 42CrMo4 steels.

Key words: fasteners, medium carbon steels, heat treatment, mechanical properties, non-destructive testing.

К крепежным изделиям ответственного назначения (болты, шпильки, штоки), используемым в автомобильной и авиационной технике, предъявляют требования повышенной прочности, твердости, износостойкости при низких температурах. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют стали 40X и 30XГСА. Баланс между прочностными и пластическими свойствами изделий достигается выбором режима их отпуска после закалки. Возможные отклонения в химическом составе материала изделий и режимах их термической обработки от заданных приводят к недопустимым отклонениям свойств изделий. Это требует проводить контроль всей продукции. Прямые методы определения механических свойств являются разрушающими и не могут быть использованы для контроля качества изделий, предназначенных для эксплуатации. Неразрушающий контроль материалов и изделий физическими методами используют для обеспечения технологической и промышленной безопасности во всех промышленно развитых странах. Наиболее эффективным методом неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных сталей является магнитный.

Цель доклада – представление информации о разработанных методиках и средствах магнитного контроля качества термической обработки и твердости ответственных крепежных изделий автомобильной и авиационной техники, результатах их промышленного использования.

Результаты измерений магнитных параметров сталей 40X и 30XГСА. Механические и магнитные свойства сталей чувствительны к структурным превращениям, происходящим в сталях при термических обработках. Доказано, что коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность M_r и релаксационная намагниченность M_{Hr} (намагниченность в материале в размагничивающем поле, напряженность которого равна релаксационной коэрцитивной силе H_r) многих сталей связаны с их структурой и физико-механическими свойствами [1].

УДК 620.179.14

О ВОЗМОЖНОСТИ И НЕОБХОДИМОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ «ТЕЛА» И «ВЕЩЕСТВА» ПРИ СТРУКТУРОСКОПИИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

В. Н. КОСТИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

ON THE POSSIBILITY AND NECESSITY OF LOCAL MEASUREMENT OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE «OBJECT» AND «MATERIALS» IN THE STRUCTURESCOPY OF MATERIALS AND PRODUCTS

V. N. KOSTIN, O. N. VASILENKO

Аннотация. Показано, что, измеряя магнитное поле в отверстии специальной формы, выполненном в магнитопроводе измерительного преобразователя, и тангенциальную компоненту магнитного поля в межполюсном пространстве преобразователя вблизи поверхности намагничиваемого объекта, можно локально определять относительные значения его магнитных свойств вещества. Показано различие структурной чувствительности магнитных свойств, локально определяемых в координатах «поток – внутреннее поле» (свойства вещества) и в координатах «поток в изделии – ток в обмотках» (свойства «тела»). Показано, что локальное измерение коэрцитивной силы H_c по величине размагничивающего тока имеет принципиальное ограничение на диапазон измерений. Показана целесообразность локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по величине тангенциальной составляющей магнитного поля в межполюсном пространстве на поверхности контролируемого объекта, т. е. по внутреннему полю. Это позволяеткратно расширить диапазон измеряемых значений H_c . При этом существенно снижается влияние зазора между преобразователем и объектом, а также форма и размеры контролируемых объектов на результаты измерений.

Показана возможность и целесообразность одновременного измерения и совместного анализа магнитных характеристик вещества и «тела».

Ключевые слова: остаточная индукция, индукция коэрцитивного возврата, коэрцитивная сила, размагничивающий ток, внутреннее поле, измерительный преобразователь, аппаратно-программная система.

Abstract. It is shown that by measuring the magnetic field in a specially shaped hole made in the magnetic circuit of the measuring transducer and the tangential component of the magnetic field in the interpolar space of the transducer near the surface of the magnetized object, one can locally determine the relative values of its magnetic properties of the material. The difference in the structural sensitivity of magnetic properties, locally determined in the

coordinates «magnetic flux – internal field» (properties of the substance) and in the coordinates «magnetic flux in the object – current in the circuits» (properties of the «object») is shown. It is shown that the local measurement of the coercive force by the magnitude of the demagnetizing current has a fundamental limitation on the measurement range. The expediency of local measurement of the coercive force of ferromagnetic objects by the magnitude of the tangential component of the magnetic field in the interpolar area on the surface of the object (i. e. by the inner field) is shown. This allows you to expand the range of measured values by several times. This significantly reduces the effect of the gap between the transducer and the object, as well as the shape and size of the testing objects on the measurement results.

The possibility and expediency of simultaneous measurement and combined analysis of the magnetic characteristics of a material and a «object» is shown.

Key words: residual induction, induction of coercive return, coercive force, demagnetizing current, internal field, measuring transducer, hardware and software system.

Разработка новых способов и устройств локального измерения магнитных параметров в целях структуроскопии ферромагнитных объектов является динамически развивающимся научно-техническим направлением. Это обусловлено высокой чувствительностью статических и динамических магнитных характеристик к изменениям структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний ферромагнитных материалов и объектов.

Используемые измерительные средства имеют существенные ограничения, например, измерение коэрцитивной силы по размагничивающему току. Для приставного измерительного преобразователя, представляющего собой двухполюсной U-образный электромагнит со встроенным в его магнитопровод рамочным феррозондом, связь между током размагничивания I_c и коэрцитивной силой H_c намагниченного объема однородного контролируемого изделия описывают следующим выражением:

$$I_c = \frac{1}{W} \left[\frac{R_{F1} U_{сн}}{R_{F1} + R_{\delta} + R_{и}} + U_{сз} \right], \quad (1)$$

где W – суммарное количество витков обмоток электромагнита; $U_{сн}$ и $U_{сз}$ – падение магнитного потенциала на изделии и на электромагните при нулевом магнитном потоке в магнитной цепи «приставной преобразователь – контролируемый объект»; R_{F1} , R_{δ} и $R_{и}$ – магнитные сопротивления магнитному потоку через воздух между полюсами электромагнита, воздушного зазора между полюсами и изделием и самого изделия соответственно; $U_{сн} \sim H_c l_{и}$ ($l_{и}$ – средняя длина магнитной силовой линии в изделии).

Магнитное сопротивление i -го участка цепи $R_i = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i}$ (l_i , S_i , μ_i – длина, площадь поперечного сечения и магнитная проницаемость i -го участка магнитной цепи соответственно).

УДК 620.179.14

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРИБОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТВЕТСТВЕННЫХ КРЕПЕЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

METHODOLOGICAL FEATURES AND A DEVICE FOR MAGNETIC CONTROL OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CRITICAL FASTENING COMPONENTS

S. G. SANDOMIRSKI

Аннотация. К крепежным изделиям ответственного назначения, предъявляя требования повышенной прочности, твердости, износостойкости. Их изготавливают из среднеуглеродистых сталей 40Х, 30ХГСА, легированных хромом, марганцем, кремнием. Баланс между прочностными и пластическими свойствами изделий достигают закалкой и последующим отпуском. Отклонения в химическом составе и режимах термической обработки изделий приводят к недопустимым отклонениям их свойств. Это требует проводить контроль всей продукции. Магнитный структурный анализ основан на том, что механические и магнитные свойства сталей чувствительны к структурным превращениям, происходящим в них при термических обработках. При контроле массовых партий изделий лучшие по производительности и достоверности результаты обеспечивают намагничивание изделий при падении сквозь катушку с постоянным током и измерение остаточного магнитного потока Φ_d в изделии. При этом Φ_d в изделиях пропорционален не остаточной намагниченности M_r , а коэрцитивной силе H_c материала изделий. Но особенностью сталей с содержанием углерода больше 0,3 % является немонокотное изменение H_c с увеличением температуры T_o отпуска закаленных изделий. Для контроля режима отпуска таких изделий предложено намагниченные изделия перед измерением Φ_d дозировать размагничивать полем H_p . Разработанная методика позволяет выбрать H_p , при котором достигается оптимальная чувствительность к изменениям T_o . Показано, что такой контроль основан на чувствительности Φ_d в изделии после его перемагничивания полем H_p к M_r материала изделия. Созданные технические средства обеспечивают промышленное применение методики для контроля твердости болтов из сталей 40Х и 30ХГСА.

Ключевые слова: крепежные изделия, среднеуглеродистые стали, термическая обработка, механические свойства, неразрушающий контроль.

Abstract. The fasteners for critical purposes are subject to the requirements of increased strength, hardness, and wear resistance. They are made of medium-carbon steels alloyed with chromium, manganese, silicon: 37Cr4, 42CrMo4. The balance between the strength and plastic properties of products is achieved by quenching and subsequent tempering. Deviations in the chemical composition and modes of heat treatment of products lead to unacceptable deviations of their properties. This requires control of all products. Magnetic structural analysis is based on the fact that the mechanical and magnetic properties of steels are sensitive to structural transformations that occur in them during heat treatments. When controlling mass batches of

7. **Магомедов, Ш. Ш.** Надежность и конкурентоспособность кожаной обуви: теория, оценка: дис. ... д-ра техн. наук: 05.19.08 / Ш. Ш. Магомедов. – Ставрополь, 2004. – 302 с.

8. **Карабанов, П. С.** Корреляционная связь показателей свойств обувных материалов / П. С. Карабанов, А. В. Колесникова, Г. А. Бороздина // Вестн. Сибирского ун-та потребительской кооперации. – 2018. – № 3 (25). – С. 91–93.

9. **Карабанов, П. С.** Исследование корреляционной связи показателей свойств обувных термоэластопластов / П. С. Карабанов, А. В. Колесникова, Г. А. Бороздина // Инновации и современные технологии в индустрии моды: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. – Москва: РГУ им. А. Н. Косыгина, Новосибирский технолог. ин-т (филиал), 2018. – С. 78–82.

10. **Радюк, А. Н.** Получение подошв из отходов пенополиуретанов с волокнистым наполнителем / А. Н. Радюк, А. Н. Буркин // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Витебск, 21–22 нояб. 2018. – Витебск: ВГТУ, 2018. – С. 266–269.

11. Официальный сайт компании «Dow Izolan» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dow-izolan.com/ru/production/footwear-industry/>. – Дата доступа 14.07.2020.

12. **Карабанов, П. С.** Полимерные материалы для деталей низа обуви: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Технология, конструирование изделий и материалы легкой промышленности». – Москва: КолосС, 2008. – 167 с.

E-mail: ana.r.13@mail.ru; a.burkin@tut.by.

Как можно увидеть из выражения (1) и как следует из многочисленных экспериментов, на измерительные возможности и показания коэрцитиметров с измерением размагничивающего тока оказывают влияние следующие основные факторы: размеры и форма контролируемых объектов; размеры и форма используемых приставных электромагнитов; наличие и величина зазоров в магнитной цепи «приставной преобразователь – объект»; степень однородности свойств в намагниченном объеме, что, в свою очередь, является физической основой коэрцитиметрического контроля глубины упрочненных слоев; тип и характеристики нуль-индикатора магнитного потока в цепи «приставной преобразователь – объект». Коэрцитиметры с измерением размагничивающего тока (РТ-коэрцитиметры) получили весьма широкое распространение.

На рис. 1 представлены зависимости показаний коэрцитиметра КИФМ-1 (РТ-коэрцитиметр) от абсолютных значений коэрцитивной силы трех групп образцов. Как видно из рис. 1, для всех типоразмеров образцов по величине размагничивающего тока измерение коэрцитивной силы H_c более 45...50 А/см невозможно.

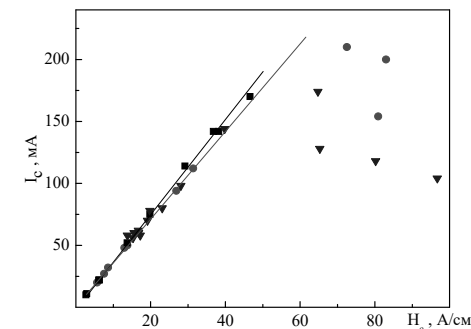


Рис. 1. Зависимость показаний коэрцитиметра КИФМ-1 от абсолютных значений коэрцитивной силы образцов трех групп: СОКС (■), ОМИ (●) и Н18К9М5Т (▼)

Такое ограничение можно объяснить следующим образом. При отсутствии зазора в магнитной цепи ($R_\delta = 0$) выражение (1) имеет вид:

$$I_c = \frac{1}{W} \left[\frac{R_{F1} U_{сн}}{R_{F1} + R_{и}} + U_{сз} \right]. \quad (2)$$

При $R_{и} \ll R_{F1}$, что означает измерение сравнительно небольших значений коэрцитивной силы и достаточно большую площадь поперечного сечения контролируемого объекта, выражение (2) можно переписать в виде

$$I_c = \frac{1}{W} [U_{сн} + U_{сз}]. \quad (3)$$

Если при этом $U_{сн} \gg U_{сз}$, что является обязательным условием и обеспечивается материалами и конструкцией приставного преобразователя [2], то размагничивающий ток пропорционален измеряемой коэрцитивной силе.

Однако выражение (2) можно также записать в виде

$$I_c = \frac{1}{W} \left[\frac{U_{сн}}{1 + R_{и}/R_{Ф1}} + U_{сз} \right]. \quad (4)$$

При увеличении измеряемых значений H_c будет возрастать магнитное сопротивление изделия $R_{и}$, поскольку рост коэрцитивной силы ферромагнетиков практически всегда сопровождается уменьшением их магнитной проницаемости. При $R_{и} \rightarrow R_{Ф1}$ первое слагаемое в (4) будет стремиться к величине $\frac{U_{сн}}{2}$, что в сравнении с (3) означает двукратное

уменьшение чувствительности к коэрцитивной силе. Однако отношение $R_{и}/R_{Ф1}$ может даже превышать единицу, например при малой площади поперечного сечения контролируемого объекта. Значит при высоких значениях коэрцитивной силы по мере роста магнитного сопротивления изделия $R_{и}$ в выражении (4) рост числителя в первом слагаемом будет сопровождаться ростом знаменателя. Это является причиной нарушения пропорциональности между измеряемой величиной H_c и размагничивающим током I_c . Сделанный вывод подтверждается данными рис. 1, из которого видно, что при сопоставимых ($H_c \approx 80$ А/см) значениях коэрцитивной силы образцам Н18К9М5Т с меньшей площадью поперечного сечения соответствуют значительно меньшие значения размагничивающего тока I_c .

Таким образом, РТ-коэрцитиметрия имеет принципиально ограниченный диапазон измерений как снизу (не более коэрцитивной силы магнитопровода приставного преобразователя), так и сверху.

В [1, 2] показано, что измеряя магнитное поле в отверстии-преобразователе, выполненном в магнитопроводе приставного преобразователя, можно определить относительную величину магнитного потока в контролируемом объекте и, учитывая постоянство площади поперечного сечения намагниченной области испытуемого объекта, определить относительную величину индукции в этой области.

Одновременно с измерением магнитного потока можно измерять тангенциальную составляющую поля на поверхности объекта в межполюсном пространстве. Тангенциальная компонента не терпит разрыва на границе двух

Окончание табл. 1

Этап	Результат
9	$f_p(1) = 5,2 \text{ МПа};$ $f_{pн} = \frac{5,2}{30} = 0,173;$ $\beta_n = 0,173 - 0,1019 \cdot \left(\frac{0,173}{0,1019} \right)^{-0,0524} = 0,0742;$ $\beta(1) = \beta_n \cdot \beta_{max} = 0,0742 \cdot 90 = 6,7$
10	$\Delta\gamma = \frac{\beta(1) - \beta_\phi}{\beta_\phi} \cdot 100 \%;$ $\Delta\gamma = \frac{6,7 - 6,5}{6,5} \cdot 100 \% = 3,08 \%.$ Полученный результат свидетельствует об удовлетворительной точности расчета

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радюк, А. Н. Обоснование показателей свойств материалов для оптимизации технологического процесса переработки отходов полиуретана / А. Н. Радюк // Моделирование в технике и экономике: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Витебск, 23–24 марта 2016 г. – Витебск, 2016. – С. 148–150.
2. ГОСТ 4.387–85. Система показателей качества продукции. Материалы синтетические для низа обуви. Номенклатура показателей. – Введен 01.01.1987. – Минск: М-во легкой промышленности СССР, 1985. – 12 с.
3. ГОСТ 426–77. Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении. – Взамен ГОСТ 426-66; введен 01.01.1978. – Минск: Гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь, 1992. – 8 с.
4. Краснов, Б. Я. Материалы для изделий из кожи: учебник для средних учебных заведений легкой промышленности / Б. Я. Краснов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Легпромбытиздат, 1995. – 344 с.
5. Жихарев, А. П. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности: учебник для студентов высших учебных заведений / А. П. Жихарев, Д. Г. Петропавловский, С. Г. Кузин. – Москва: Академия, 2004. – 442 с.
6. Закатова, Н. Д. Эксплуатационные свойства обувных материалов и деталей / Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева. – Москва: Легкая индустрия, 1966.

позволяет определять показатель сопротивления истиранию, что немаловажно для обувных предприятий, не располагающих необходимым для испытаний данного показателя оборудованием.

Табл. 1. Результаты выполнения алгоритма

Этап	Результат																											
1, 2	Представление данных: f_p – условная прочность при разрыве; β – сопротивление истиранию <table><tr><th></th><th>f_p, МПа</th><th>β, Дж/мм³</th></tr><tr><td>1</td><td>5,2</td><td>6,5</td></tr><tr><td>2</td><td>5,3</td><td>6,3</td></tr><tr><td>3</td><td>5,4</td><td>6,4</td></tr><tr><td>4</td><td>5,4</td><td>6,3</td></tr><tr><td>5</td><td>5,5</td><td>6,6</td></tr><tr><td>6</td><td>5,5</td><td>6,5</td></tr><tr><td>7</td><td>5,6</td><td>6,8</td></tr><tr><td>8</td><td>5,7</td><td>6,7</td></tr></table>		f_p , МПа	β , Дж/мм ³	1	5,2	6,5	2	5,3	6,3	3	5,4	6,4	4	5,4	6,3	5	5,5	6,6	6	5,5	6,5	7	5,6	6,8	8	5,7	6,7
	f_p , МПа	β , Дж/мм ³																										
1	5,2	6,5																										
2	5,3	6,3																										
3	5,4	6,4																										
4	5,4	6,3																										
5	5,5	6,6																										
6	5,5	6,5																										
7	5,6	6,8																										
8	5,7	6,7																										
3	$f_{p_n} = \frac{f_{p_i}}{f_{p_{\max}}}; \quad \beta_n = \frac{\beta_i}{\beta_{\max}},$ где f_{p_n}, β_n – нормируемая величина показателя; f_{p_i}, β_i – текущее i-е значение показателя; $f_{p_{\max}}$, $\beta_{\max}$ – максимальное значение показателя																											
4	Анализируя показатели прочности полиуретановых систем для подошв обуви различных производителей, можно заметить, что наибольшее значение (30 МПа) показателя характерно для полиуретановых систем фирмы «Dow Chemical Co» [11]. Наибольшее значение (90 Дж/мм³) показателя сопротивления истиранию взято из [12]																											
5–7	Зависимость – $f_{p_n} - \beta_n$ Графическое представление $y = 0,1019x^{0,0524}$ $R^2 = 0,9157$																											
8	$f_{p_n} = 0,1019N^{0,0524};$ $N = \left(\frac{f_{p_n}}{0,1019} \right)^{-0,0524};$ $\beta_n = f_{p_n} - 0,1019 \cdot \left(\frac{f_{p_n}}{0,1019} \right)^{-0,0524}$																											

сред, поэтому измеряемое вблизи поверхности поле практически равно внутреннему полю в объекте. Корректное измерение внутреннего поля снимает ограничения на диапазон измеряемых магнитных свойств.

Таким образом, измеряя относительную величину потока и внутреннее поле в испытуемом объекте, можно локально определять его магнитные свойства.

Указанный выше способ был использован в приборах серий SIMTEST и DIUS. На рис. 2 для четырех образцов с размерами $7,5 \times 34 \times 57$ мм, имеющих различные значения коэрцитивной силы, приведены локально измеренные петли гистерезиса вещества и «тела».

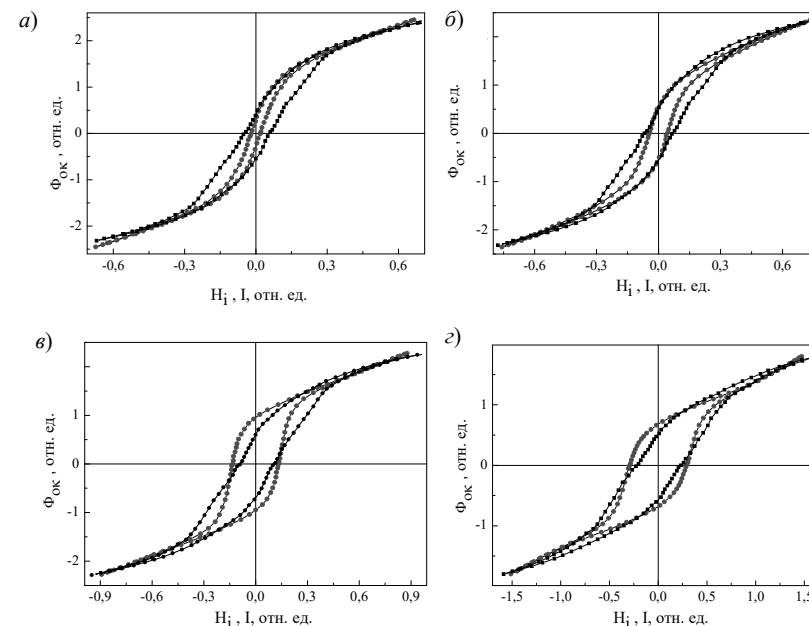


Рис. 2. Локально измеренные петли гистерезиса вещества (●) и «тела» (■) образцов с различными значениями коэрцитивной силы: $H_c = 2,7$ А/см (а); $H_c = 6,3$ А/см (б); $H_c = 19,8$ А/см (в); $H_c = 46,6$ А/см (з)

Петля гистерезиса в координатах «поток в объекте – ток в обмотках» может быть измерена на объектах любых размеров и формы. В этом случае измерение коэрцитивной силы «тела» аналогично измерениям с помощью известного коэрцитиметра КИФМ-1 и может использоваться для решения такого же широкого круга задач.

Совокупный анализ свойств вещества и «тела» дает гораздо больше возможностей для структуроскопии. Ранее в наших работах было показано,

как дополнительный учет характеристик «тела» позволяет уменьшить мешающее влияние неконтролируемого зазора в цепи «преобразователь – объект» на результаты локального измерения таких магнитных параметров вещества, как индукция коэрцитивного возврата и коэрцитивная сила.

Для практической реализации указанных выше измерительных возможностей разработана отвечающая современным требованиям мобильная аппаратно-программная система DIUS-1.15M.

Таким образом, было показано, что:

- измерение магнитного потока в испытуемых объектах по полю в отверстии-преобразователе, выполненном в магнитопроводе намагничивающего устройства, и измерение внутреннего поля в объекте путем измерения тангенциальной составляющей поля вблизи поверхности объекта позволяют локально определять весь комплекс магнитных свойств вещества ферромагнитных объектов;

- различие структурной чувствительности магнитных свойств локально определяемых в координатах «поток – внутреннее поле» и «поток в изделии – ток в обмотках». Показана целесообразность одновременного измерения и совместного анализа магнитных характеристик вещества и «тела»;

- определение коэрцитивной силы с помощью обычного двух-полюсного преобразователя по величине тангенциальной компоненты магнитного поля, измеряемой вблизи поверхности испытуемого объекта в межполюсном пространстве, позволяет существенно расширить диапазон измерений;

- разработанная мобильная аппаратно-программная система DIUS-1.15M может применяться для решения широкого круга задач магнитной структуроскопии ферромагнитных изделий при наличии корреляционной связи между контролируемыми параметрами и измеряемыми устройством магнитными свойствами.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРАЗОВАНИЯ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kostin, V. N.** DIUS-1.15M. Mobile Hardware–Software Structuroscopy System / V. N. Kostin, O. N. Vasilenko, A. V. Byzov // Russian journal of nondestructive testing. – 2018. – Vol. 54. – P. 654–661.
2. О преимуществах локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по внутреннему полю / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2020. – Vol. 7. – P. 21–27.

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

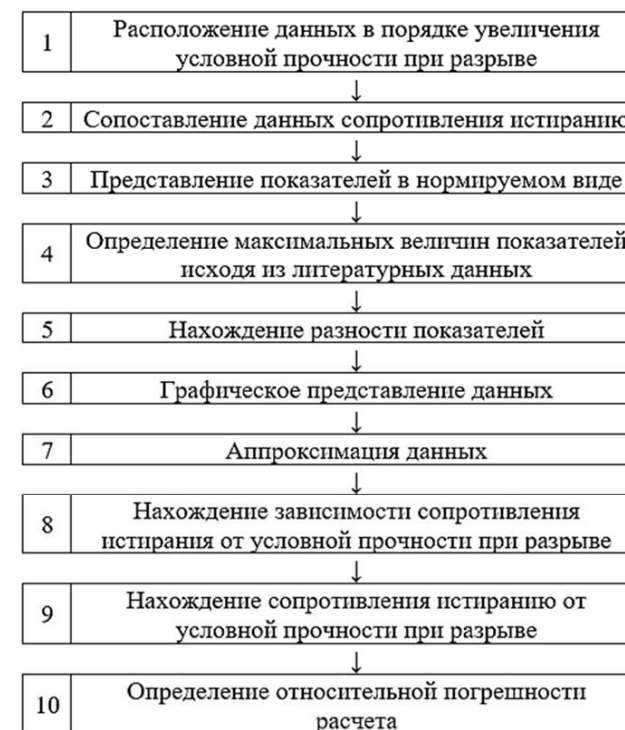


Рис. 1. Алгоритм выявления количественной корреляционной связи

Объектом исследования в данной работе выступали материалы для подошв обуви на полимерной матрице из вторичного полиуретана с волокнистым наполнителем, получаемые методом литья под давлением смеси путем добавления в их состав, помимо отходов пенополиуретанов обувных предприятий, дополнительных ингредиентов (масло индустриальное, стеарат кальция) и отходов коврового производства (кноп стригальный полипропиленовый). Подробно технология производства материалов и подошв изложена в [10].

Результаты выполнения алгоритма выявления количественной корреляционной связи представлены в табл. 1.

Таким образом, математическая модель, представленная на восьмом этапе алгоритма (см. табл. 1) позволяет, не проводя испытаний при известном значении условной прочности при разрыве, найти значение сопротивления истиранию. Расчет относительной погрешности составил $\Delta y = 3,08 \%$. Таким образом, использование математической модели

показатель с разными единицами измерения. Кроме того, между размерностями показателя истираемость / сопротивление истиранию / истирание не существует коррелирующей зависимости. При этом в [1] в результате проведенного анализа выявлено, что одним из основных эксплуатационных показателей для полимерных материалов для низа обуви является сопротивление истиранию.

Согласно ГОСТ 4.387–85 Система показателей качества продукции. Материалы синтетические для низа обуви. Номенклатура показателей [2] сопротивление истиранию пластин и деталей из синтетических материалов для низа обуви (резина, термопластичный эластомер, поливинилхлорид, полиуретан) определяется по ГОСТ 426–77 [3] и выражается в джоулях на кубический миллиметр.

На сегодняшний день в различных литературных источниках имеются сведения о связи многих показателей физико-механических свойств подошвенных материалов с износостойкостью [4–7]:

- с увеличением предела прочности при растяжении и увеличении твердости подошвы уменьшается ее истираемость;
- с повышением модуля упругости и жесткости подошвы снижаются ее амортизационные свойства, а это приводит к некоторому снижению и показателя ее износостойкости;
- в процессе носки обуви скорость изнашивания подошвы постепенно повышается за счет снижения ее амортизационных свойств;
- в прямой связи с износостойкостью резиновой подошвы находится ее упругость;
- износ синтетических материалов связан с энергией активации течения. Так, например, энергия активации течения ТЭП (термоэластопласта) в 2 раза ниже, чем пластифицированного ПВХ, а следовательно, выше эффект смазывания трущихся поверхностей, выше сопротивление к истиранию;
- на износостойкость подошвы влияет относительное ее удлинение; так, износ подошвы за счет ее излома наблюдается там, где использован материал с низким показателем относительного удлинения;
- износостойкость подошвы зависит от динамической ее выносливости. Отмечается также, что в износе резиновой подошвы превалирует усталостный характер;
- в тесной связи с износостойкостью подошвенной резины находится ее прочность при сжатии.

Однако в приведенных работах количественно эта связь не определена. В связи с этим данная работа направлена на выявление связи между условной прочностью при разрыве и сопротивлением истиранию. Для выявления количественной корреляционной связи на основании методики, представленной в [8, 9], был разработан алгоритм, приведенный на рис. 1.

УДК 621.317.39

КОНТРОЛЬ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ СБОРКЕ

А. С. ЛЕВИЦКИЙ, Е. А. ЗАЙЦЕВ, М. В. ПАНЧИК

Институт электродинамики НАН Украины
Киев, Украина

UDC 621.317.39

TURBOGENERATOR STATOR CORE ASSEMBLY CONTROL

A. S. LEVYTSKYI, I. O. ZAITSEV, M. V. PANCHYK

Аннотация. Разработан метод автоматического контроля ослабления монолитности сердечника статора мощного турбогенератора, предназначенный для обнаружения дефектов при сборке сердечника на заводе-изготовителе. Для контроля используется многосенсорная информационно-измерительная система с тензометрическим преобразователем удельного давления прессования в N точках поперечного сечения сердечника, где устанавливаются легко деформируемые контрольные пробы. Приведена разработанная конструкция устройства, в которой реализован предложенный метод. Устройство в виде специального нажимного кольца устанавливается на торцевую поверхность сердечника.

Ключевые слова: турбогенератор, сердечник статора, сборка, прессование, давление, контроль, измерительная ячейка, деформируемая проба, мембрана с жестким центром, тензометрический сенсор.

Abstract. In this paper was proposed method for hardness weakening powerful turbine generator stator core automatic control. It's method designed to detect defects during core assembly at the manufacturing plant. A multi-sensor information-measuring system with a strain-gauge transducer of the specific pressing pressure at N points of the core cross-section is used for control, where easily deformable control samples are installed. The developed design of the device, which implements the proposed method, is presented. The system in the form of a special pressure ring is installed on the end surface of the core.

Key words: turbogenerator, stator core, assembly, compression, control, measuring cell, deformable test, rigid center membrane, strain gauge sensor.

Сердечник является одним из основных узлов статора мощного турбогенератора (ТГ). Его работоспособность в основном определяется состоянием упругого сжатия, которое он первоначально получает на заводе-изготовителе во время сборки и прессовки. Как правило, при сборке сердечника штампованные и лакированные сегменты из электротехнической стали должны быть уложены со сравнительно высокой точностью и спрессованы с одинаковой плотностью по всему объему сердечника для обеспечения вибрационной устойчивости и заданных электромагнитных характеристик [1]. Но во время сборки и прессовки сердечника через различные технологические причины (неравномерность листов по толщине, неравномерность лакового покрытия и т. д.) появляются неравномерности в

его монолитности в разных точках поперечных сечений. Эти неравномерности, то есть местные уменьшения монолитности, необходимо диагностировать в как можно большем количестве точек поперечного сечения сердечника.

Самым простым способом диагностирования является способ обнаружения мест с ослабленной прессовкой с применением специальных щупов или ножей, которые вводятся между листами пакета [2, 3]. Мерио спрессованности является величина заглубления клиновидного щупа между отдельными листами. Такой метод занимает много времени, неточен и субъективен. К тому же проникновение щупа между листами может привести к дефектам лаковой изоляции и, как следствие, к образованию замкнутых контуров и возникновению локальных перегревов сердечника во время работы машины.

Существует способ контроля сердечника с измерением усилий сжатия пакета сердечника с применением специальных устройств в виде штангенциркуля или струбины [1, 4]. Во время контроля их губки через вентиляционные каналы охватывают отдельные пакеты. Ненормированное уменьшение толщины пакета под действием зажимных губок указывает на местные неплотности сердечника. Способ также трудоемок и, как правило, его применение позволяет проведение контроля только со стороны раскладки сердечника.

Применение вибромеханического [5] и ультразвукового [6] методов контроля для обнаружения дефектных мест в сердечнике при сборке из-за сложности устройств затруднительно.

На Государственном предприятии «Завод «Электротяжмаш» (г. Харьков, Украина) был разработан метод обнаружения участков сердечника с ослабленной монолитностью во время сборки и прессовки. Для этого под нажимным кольцом пресса в 45 точках на торцевой поверхности сердечника помещаются специальные пробы из легкодеформируемого материала (например, свинца) [7]. При этом деформация проб будет зависеть от величины дефекта сердечника, в зоне которого они расположены: наибольшая деформация будет соответствовать наименьшему дефекту и, наоборот, наименьшая деформация – наибольшему дефекту. Равномерное расположение контрольных проб по торцу сердечника (три пробы на один сегмент) обеспечивается применением дополнительного нажимного кольца на прессе с вставленными контрольными ячейками с пробами. Метод применен при сборке и прессовке сердечника статора ТГ типа ТГВ-250-2ПТЗ. Недостатком устройства является низкая производительность труда, так как оценка деформации проб производится вручную, без автоматизации.

В данной работе представлен метод автоматического контроля сердечника статора мощного ТГ при его сборке и прессовании, в котором степень дефекта сердечника определяется с использованием системы

УДК 685.34.06:685.34.082:620.17

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОДОШВ ОБУВИ

А. Н. РАДЮК, М. А. КОЗЛОВА, А. Н. БУРКИН

Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь

UDC 685.34.06:685.34.082:620.17

PREDICTING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF SHOE SOLES

A. N. RADYUK, M. A. KOZLOVA, A. N. BURKIN

Аннотация. Проведен анализ работ о взаимосвязи показателей физико-механических свойств подошвенных материалов с износостойкостью. Выявлена количественная корреляционная связь между условной прочностью при разрыве и сопротивлением истиранию. Разработан алгоритм для этих целей. Построена математическая модель, позволяющая с удовлетворительной точностью прогнозировать значения показателя сопротивления истиранию по данным упругопрочностных свойств.

Ключевые слова: полимерные материалы, показатели свойств, корреляционная связь, алгоритм, математическая модель.

Abstract. The analysis of works on the relationship of indicators of physical and mechanical properties of plantar materials with wear resistance is carried out. A quantitative correlation between the conditional tensile strength and abrasion resistance was found. An algorithm has been developed for this purpose. A mathematical model is constructed. It allows you to predict the values of the abrasion resistance index with satisfactory accuracy based on the data of elastic-strength properties.

Key words: polymer materials, property indicators, correlation, algorithm, mathematical model.

Выбор полимерных материалов для производства подошв повседневной обуви основывается на значениях показателей их физико-механических и эксплуатационных свойств. Однако чаще всего имеются данные лишь об упругопрочностных свойствах подошвенных материалов как основополагающих показателях их механических и эластических свойств. Это обстоятельство затрудняет обоснованный выбор подошвенных материалов и прогнозирование их долговечности. Этому также способствует отсутствие необходимого испытательного оборудования на обувных предприятиях Республики Беларусь и однозначного определения некоторых показателей свойств. Так, например, истираемость / сопротивление истиранию / истирание подошвенных материалов различных производителей определяется по различным стандартам и выражается в миллиграммах, в кубических миллиметрах, в джоулях на кубический миллиметр. В связи с этим провести сравнительный анализ данных не представляется возможным, так как между собой нельзя сравнивать

различных исследований, направленных на выбор оптимальных параметров контроля и повышение достоверности локации источников акустической эмиссии. Так, в составе лабораторного стенда представлены несколько типов волноводов, различающихся материалом, геометрической формой и размерами, способом крепления к объекту контроля. Информация об особенностях изменения спектральных и временных характеристик акустико-эмиссионных сигналов, прошедших через волновод, послужит основой обоснованного выбора схемы контроля и снизит вероятность получения ложных координат.

Таким образом, метод акустической эмиссии относится к сложным методам неразрушающего контроля, требующим высокой квалификации специалистов. Накопление опыта работы эффективно проводить на макетах реальных объектов, имитирующих в том числе неидеальные условия контроля методом акустики эмиссии на производстве. Вышеописанный стенд для акустико-эмиссионного контроля позволяет воссоздать акустико-эмиссионную картину сигналов, приближенную к реальной на опасных производственных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поллок, А. Акустико-эмиссионный контроль [Электронный ресурс] / А. Поллок // Авторская перепечатка из книги Металлы (METALS HANDBOOK). – 9-е изд. – 1989. – Т. 17. – С. 278–294. – Режим доступа: <http://www.diapac.ru/Articles/Pollock.pdf>.
2. Бигус, Г. А. Диагностика технических устройств / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 615 с.: ил.
3. Кузнецов, Н. С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии: методическое пособие / Н. С. Кузнецов. – Москва: Машиностроение, 1998. – 96 с.
4. Патент US № 4018048. – Оpubл. 13.05.1976.
5. Специализированный стенд для обучения и сдачи практического экзамена по акустико-эмиссионной диагностике промышленных объектов / А. А. Шаталов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 7. – С. 24–26.
6. Патент SU № 1366936. – Оpubл. 15.01.1988.
7. Genis, V. Nondestructive Evaluation Courses for Undergraduate Engineering and Engineering Technology Students / V. Genis, A. Pollock // Proceedings of the EWGAE-ICAE. – 2012.
8. Универсальный учебно-исследовательский стенд изучения генерации и распространения акустических волн в элементах промышленных объектов от имитаторов реальных источников акустической эмиссии: пат. RU 2608969 / А. Ю. Виноградов, Д. Л. Мерсон, И. А. Растегаев, А. В. Даниук. – Оpubл. 30.01.2017.

контрольных легкодеформируемых свинцовых проб и измерителя удельного давления, действующего на каждую пробу. Величина удельного давления с помощью специальных тензорезисторов преобразуется в электрический сигнал.

Устройство, реализующее метод, представляет собой дополнительное нажимное кольцо с контрольными ячейками. На прессе кольцо устанавливается на торцевую поверхность сердечника под нажимное кольцо, являющееся технологической оснасткой при прессовании. Дополнительное кольцо получило наименование «нижнее нажимное кольцо», а кольцо технологической оснастки – «верхнее нажимное кольцо». Контрольные ячейки устанавливаются равномерно по кольцу из расчета три ячейки на один стальной сегмент сердечника. Например, если по кольцу сердечника устанавливается 15 сегментов, то количество контрольных ячеек $N = 45$. В состав устройства также входят электронный блок регистрации и обработки измерительной информации и соединительные кабели между контрольными ячейками и электронным блоком.

Схема установки дополнительного кольца на прессе показана на рис. 1, общий вид дополнительного кольца – на рис. 2, принцип работы контрольной ячейки – на рис. 3.

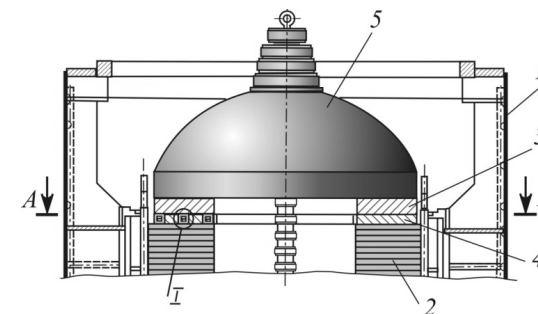


Рис. 1. Схема установки дополнительного нажимного кольца на прессе: 1 – корпус статора ТГ; 2 – сердечник статора ТГ; 3 – верхнее нажимное кольцо; 4 – нижнее дополнительное нажимное кольцо; 5 – зонтичный пресс; I – контрольная ячейка

На рис. 3 показано: 1 – сердечник статора; 2 – верхнее нажимное кольцо пресса; 3 – нижнее нажимное кольцо пресса; 4 – стакан; 5 – недеформированная свинцовая проба; 5.1 – деформированная свинцовая проба; 6 – втулка; 7 – мембрана с жестким центром; 8 – тензорезисторы.

Высота втулки 6 выбрана из условия – расстояние между ее верхней поверхностью и верхней поверхностью кольца 3 примерно равно толщине пробы 5 и одинаково для всех контрольных ячеек.

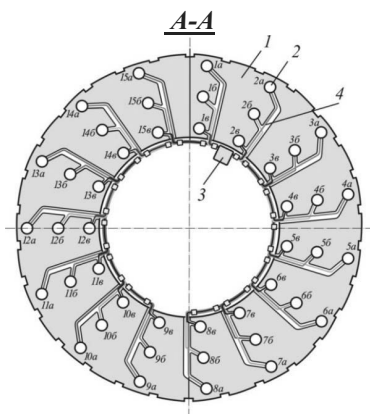


Рис. 2. Общий вид дополнительного кольца: 1 – металлический диск; 2 – контрольная ячейка; 3 – кабели; 4 – электронный блок регистрации и обработки измерительной информации

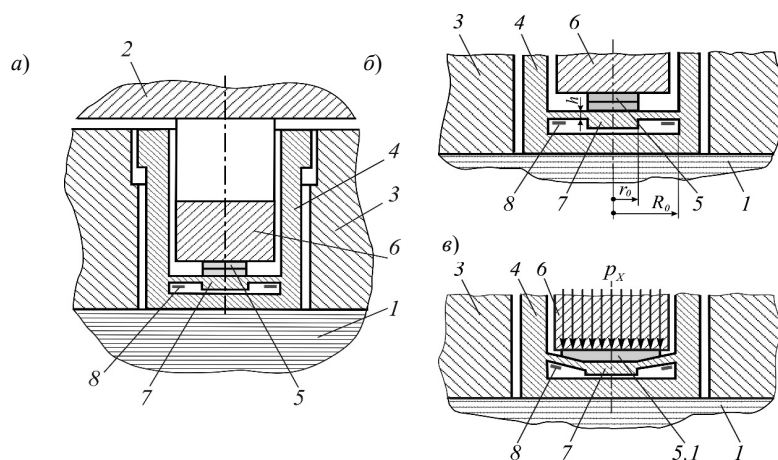


Рис. 3. Принцип работы контрольной ячейки: а – общая конструктивная схема ячейки; б – состояние мембраны и контрольной пробы до приложения давления пресса; в – состояние мембраны и контрольной пробы после приложения давления пресса

Во время прессования сердечника удельное давление пресса p_x через втулку б воздействует на пробу 5 и мембрану 7 (см. рис. 3, в). Проба 5 будет деформирована, мембрана 7 прогнется, в ней возникнут радиальные σ_r напряжения и, соответственно, относительные радиальные ε_r деформации.

ратуры, определения скорости распространения и затухания волн на различных объектах;

- применение фильтрации, алгоритмов обработки сигналов, локации источников акустической эмиссии;
- исследование особенностей применения волноводов;
- исследование особенностей течеискания в трубопроводах, корпусах сосудов;
- проведение межлабораторных сличений по акустико-эмиссионному методу для аккредитованных испытательных лабораторий.

В состав лабораторного стенда включены макеты наиболее распространенных потенциально опасных промышленных объектов – сосудов, работающих под давлением, трубопроводов, металлоконструкций резервуаров, грузоподъемных механизмов и т. п.

Лабораторный стенд содержит:

- макет объемного объекта. Это цилиндрический сосуд с двумя эллиптическими днищами, штуцерами и арматурой;
- макет линейного объекта. Макет представляет собой трубопровод, выполненный в зигзагообразном виде, с целью обеспечения компактности. На макете предусмотрены волноводы для крепления датчиков;
- макет плоскостного объекта. Макет представляет собой лист металла;
- нагружающее устройство, которое предназначено для заполнения рабочей средой макетов объектов. В нагружающем устройстве использована газообразная рабочая среда. Нагружающее устройство состоит из компрессора с ресивером, системы запорных вентилей, предохранительного клапана и гибких соединительных шлангов;
- акустико-эмиссионная система для регистрации и анализа сигналов.

В лабораторном стенде применена акустико-эмиссионная система «Лель» (A-Line 32D (DDM)) компании «ИНТЕРЮНИС». Это многоканальная модульная система сбора и обработки акустико-эмиссионной информации распределённого типа с последовательным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных.

Конструкция элементов стенда имеет возможность создания шумовых явлений, вызванных пропуском рабочей среды через фланцевое соединение, неплотность запорной арматуры, искусственной имитации течи в теле объекта. Макет трубопровода, сосуда в полной мере может представлять объект для поиска мест истекания рабочей среды под давлением с регулируемым расходом для апробации различных способов локации источников акустической эмиссии.

Помимо получения практических навыков проведения акустико-эмиссионного контроля, с помощью стенда возможно проведение

интегральные задачи диагностики, то есть выполняет быструю и производительную оценку состояния всего объекта.

Метод технической диагностики на основе акустической эмиссии позволяет обнаруживать различные дефекты, оценивать их размеры, степень опасности, прогнозировать нагрузку разрушения и ресурс. Контроль одним преобразователем в материалах со слабым затуханием ультразвука может проводиться в зоне радиусом до десятка метров и обнаруживать акустические волны напряжений, возбуждаемые глубоко внутри материала [2].

Расчетная чувствительность акустико-эмиссионного контроля составляет порядка 10^{-6} мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм [3].

Наряду с вышеперечисленными преимуществами существуют сложности применения метода, например, связанные с тем, что на сегодняшний день не все процедуры контроля, регламентирующие акустико-эмиссионный контроль, стандартизованы техническими нормативными правовыми актами. Так, процедуры обработки, корректной фильтрации помех и шумов, анализа данных в значительной мере зависят от опыта и навыков персонала. При этом специалистам бывает затруднительно самостоятельно решать подобные задачи при проведении акустико-эмиссионной диагностики промышленных объектов, так как метод акустической эмиссии очень требователен к уровню подготовки персонала.

Для приобретения практического опыта контроля методом акустической эмиссии обычно в лабораторных условиях воспроизводят механическое нагружение (деформацию) различных образцов [4–7]. Образцы не всегда корректно передают особенности акустико-эмиссионного контроля в реальных конструкциях различного вида (геометрии), в том числе и за счет образования ложных акустико-эмиссионных событий сложной природы. Накопление навыков акустико-эмиссионного контроля рациональнее проводить на конструкциях, максимально приближенных к опасным производственным объектам в условиях эксплуатации, в том числе и для успешной идентификации дефектов, которые в реальности являются достаточно редким событием [8].

В Белорусско-Российском университете собран стенд для акустико-эмиссионного контроля, основной целью создания которого является максимально приближенная имитация акустико-эмиссионной картины, возникающей в реальных производственных условиях контроля опасных производственных объектов.

Стенд для акустико-эмиссионного контроля позволяет решать следующие задачи:

- практическое изучение физических основ акустико-эмиссионного контроля;
- приобретение навыков настройки акустико-эмиссионной аппа-

Учитывая, что мембрана есть симметричная круглая пластина, в ней по дуге одного радиуса r напряжения и относительные деформации будут одинаковыми. Схема для расчета мембраны с жестким центром показана на рис. 4.

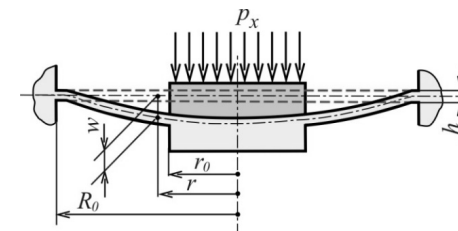


Рис. 4. Расчетная схема мембраны

Величины деформаций в отдельной точке плоской части мембраны зависят от удельного давления пресса, геометрических размеров мембраны и механических характеристик ее материала и могут быть определены по следующим формулам:

$$\varepsilon_r = \frac{w}{1-\mu^2} \left[C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3p_x r^2}{16D} + \mu \left(C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{p_x r^2}{16D} \right) \right], \quad (1)$$

где $w = A_r \frac{p_x R_0^4}{Eh^3}$; $A_r = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{c^4 - 1 - 4c^2 \ln c}{c^4}$; $C_1 = -\frac{p_x}{16D} (r_0^2 - R_0^2)$;

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$; p_x – удельное давление пресса; E – модуль упругости

материала мембраны; μ – коэффициент Пуассона; R_0 – внешний радиус мембраны; r_0 – радиус жесткого центра мембраны; h – толщина мембраны; w – прогиб средней линии мембраны в точке с радиусом r ; $c = r/r_0$.

Как известно, относительные радиальные деформации ε_r поверхности можно измерить, используя тензорезисторы, и изменение их активного сопротивления при изменении нагрузки можно определить по формуле [11–13]

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \varepsilon_r,$$

где K_T – коэффициент тензочувствительности, который зависит от изменения формы тензорезистора и изменения удельного сопротивления; ε_r – относительная радиальная деформация.

Вариант размещения тензорезисторов на мембране с жестким центром, при котором обеспечивается высокая чувствительность и линейность измерения относительных радиальных деформаций тензометрическим мостом с четырьмя тензорезисторами, приведен на рис. 5.

На рис. 5, а показано: 1 – мембрана с жестким центром; 2 – тензорезисторы, размещенные в зоне защемления мембраны (для измерения относительной радиальной деформации мембраны); 3 – тензорезисторы, размещенные возле жесткого центра мембраны. Схема включения тензорезисторов в тензометрический мост изображена на рис. 5, б.

Измерив деформации и в указанных точках мембран, определяют давление прессования в каждой из N ячеек, а учитывая то, что это давление благодаря неравномерной монолитности сердечника после прессования из-за наличия дефектов будет разным, автоматически определяются расположение дефектов и их величина.

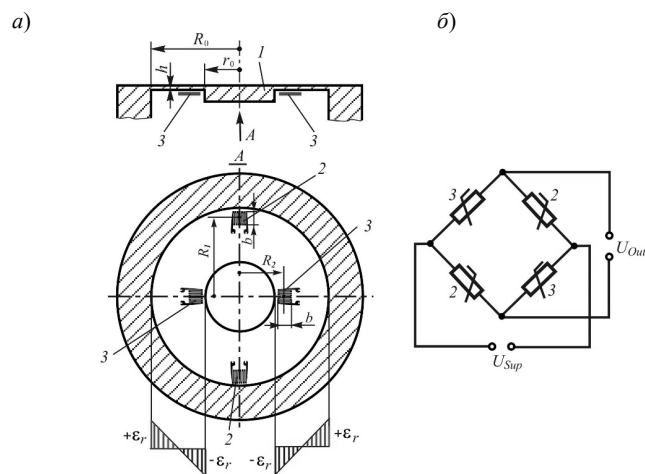


Рис. 5. Схема измерения относительных радиальных деформаций мембраны с жестким центром с использованием четырехплечего тензометрического моста

Выводы

Использование устройства позволит повысить производительность труда при контроле сердечника мощного турбогенератора при сборке и прессовке на заводе-изготовителе, с большей достоверностью диагностировать дефекты сердечника и как результат – повысить надежность электрической машины и ее долговечность.

УДК 620.179.17

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ

В. Ф. ПОЗДНЯКОВ, А. Н. ПРУДНИКОВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDK 620.179.17

RESEARCH TEST BENCH FOR ACOUSTIC EMISSION TESTING

V. F. POZDNIakov, A. N. PRUDNIKOV

Аннотация. Представлено устройство лабораторного стенда для акустико-эмиссионного контроля. Стенд включает в себя макет объемного объекта, макет линейного объекта, макет плоскостного объекта. Сигналы акустической эмиссии могут генерироваться как имитатором Су-Нильсена, системой автоматического контроля датчиков, так и имитацией течи. В конструкции стенда дополнительно предусмотрено использование различных типов волноводов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, акустико-эмиссионный метод, течеискание, стенд.

Abstract. The organization of research test bench for acoustic emission testing is being presented. Test bench contains volumetric, linear and flat object mockups. The signals of acoustic emission can be generated both by the Sou-Nilsen's simulators, the system of automatic control sensors, and simulators of leaks. The test bench construction additionally provides for the use of various types of waveguides.

Key words: acoustic emission, acoustic emission testing, leak searching, test bench.

Развитие методов неразрушающего контроля проявляется не только в совершенствовании традиционных методов дефектоскопии, а также в применении методов контроля, позволяющих не только находить дефекты, но и прогнозировать остаточный ресурс эксплуатации изделия с дефектом. Дефект в объекте контроля не всегда означает критическое снижение прочности элемента конструкции и непригодность к эксплуатации. К методам, дополняющим дефектоскопию в оценке остаточного ресурса конструкции, относят акустико-эмиссионный контроль.

Акустико-эмиссионный контроль – пассивный акустический метод, заключающийся в генерации упругих волн, которые возникают в объекте при перестройке его структуры в результате возникновения деформаций, напряжённых состояний, истечения жидкой или газообразной среды через сквозные дефекты, кристаллизации материала, внешних механических воздействий и т. д. [1].

Наибольшее распространение акустико-эмиссионный метод получил в технической диагностике, а также при поиске мест истечения рабочей среды через сквозные отверстия в объекте. Метод акустической эмиссии решает

[et al.] // Corrosion Science. – 2019. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.001>.

9. **Вершина, Г. А.** Исследование накопления заряда статического электричества на поверхности изделий из фторопласта-4 методом вибрирующего конденсатора / Г. А. Вершина, А. Л. Жарин, А. К. Тявловский // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 26–32.

10. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полимеров модифицированным зондом Кельвина [Электронный ресурс] / К. В. Пантелеев. – 2017. – № 8 (4). – С. 386–397. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-4-55-62>.

11. Установка для бесконтактного контроля однородности распределения параметров ионно-легированных и диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах диаметром до 200 мм / А. И. Свистун // Приборостроение: материалы 12 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 нояб. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 98–100.

E-mail: nil_pt@bntu.by.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фомин, Б. П.** Технология крупного электромашиностроения. Турбогенераторы / Б. П. Фомин, Б. Г. Циханович, Г. М. Виро. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1981. – Т. 1. – 303 с.

2. Справочник по ремонту турбогенераторов / С. Е. Пузаков [и др.]; под ред. Х. А. Бекова и В. В. Барило. – Москва: ИПК госслужбы, ВИПКэнерго, 2006. – 724 с.

3. **Алексеев, Б. А.** Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов / Б. А. Алексеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ЭНАС, 2001. – 152 с.

4. Stator core compressibility test. Available at [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.slideshare.net/donaldsatrianistephen/stator-core-compr-test>. – Data of access: 07.07.2020.

5. **Григорьев, А. В.** Применение параметра поглощения энергии колебаний для контроля пресовки сердечников статоров турбогенераторов / А. В. Григорьев, В. Н. Осотов, Д. А. Ямпольский // Электротехника. – 2004. – № 11. – С. 16–19.

6. Способ диагностики состояния сердечника статора электрической машины: пат. RU 2223587 / В. С. Шаронин, А. В. Полторадня. – Оpubл. 10.02.2004.

7. Контроль осердя статора потужного турбогенератора під час складання і пресування / В. Ф. Пінської [и др.] // Гідроенергетика України. – 2020. – № 1–2. – С. 55–58.

8. **Андреева, Л. Е.** Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1981. – 392 с.

9. **Скворцов, П. А.** Разработка методики расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре «Кремний на сапфире»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / П. А. Скворцов. – Москва, 2019. – 20 с.

10. **Тиняков, Ю. Н.** О расчете мембран датчиков давления / Ю. Н. Тиняков, А. С. Николанева // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2015. – № 6. – С. 135–142.

11. **Бауман, Э.** Измерение сил электрическими методами: пер. с нем. / Э. Бауман. – Москва: Мир, 1978. – 430 с.

12. **Dan Mihai Stefanescu.** Handbook of Force Transducers: Principle and Components / Dan Mihai Stefanescu. – Berlin: Springer, 2011. – 612 p.

13. Guide to the Measurement of Force. The Institute of Measurement and Control. – London: Originally published, 1998. – 46 p.

E-mail: zaitsev@i.ua.

УДК 620.179.14

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

В. П. ЛУНИН, А. Г. ЖДАНОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

УДК 620.179.14

PROSPECTS FOR USING DIGITAL MODELS FOR SOLVING CURRENT PROBLEMS IN ATOMIC ENERGY

V. P. LUNIN, A. G. ZHDANOV

Аннотация. Рассмотрены перспективы применения цифровых моделей при расчетных обоснованиях в процессе аттестационных испытаний систем неразрушающего контроля в области использования атомной энергии в связи с выходом нового ГОСТ Р 50.04.07–2018. Отмечается, что цифровые модели должны опираться на современные технологии, предусматривающие использование как адекватных (в первую очередь, трехмерных конечно-элементных) математических моделей конкретных процедур неразрушающего контроля, так и эффективных алгоритмов анализа измеренных данных. Такие модели дают возможность исследовать характер взаимодействия поля или излучения с контролируемым изделием, судить о достоинствах того или иного метода контроля и его ограничениях, выбрать наилучшие условия организации процедуры контроля, грамотно спроектировать конструкцию преобразователя в конкретной задаче, а также обоснованно задать программу анализа сигналов и принятия решения. Только так можно обеспечить требуемые ГОСТом надежное «прогнозирование сигналов от дефектов с учетом их характеристик, а также влияния местоположения и ориентации дефектов, прогнозирования зоны и объема контроля конкретного объекта (зоны) контроля». На примере внедрения программно-методического комплекса PIRATE продемонстрированы возможности использования адекватной цифровой модели в процессе аттестационных испытаний методики вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР.

Ключевые слова: цифровые конечно-элементные модели, аттестация систем контроля, парогенератор АЭС, вихретоковый контроль, теплообменные трубки.

Abstract. The prospects of using digital models for calculation justifications in the process of certification tests of nondestructive testing systems in the field of nuclear energy use in connection with the release of the new GOST R 50.04.07–2018 are considered. It is noted that digital models should be based on modern technologies that provide for the use of both adequate (first of all, finite element three-dimensional) mathematical models of specific non-destructive testing procedures, and effective algorithms for analyzing measured data. Such models make it possible to study the nature of the interaction of the field or radiation with the tested product, judge the advantages of a particular testing method and its limitations, choose the best conditions for organizing the diagnostic procedure, correctly design the transducer for a specific task, and reasonably set a program for analyzing signals and making decisions. This is the only way to provide reliably prediction of signals from defects required by GOST, taking into account their characteristics, as well as the influence of the location and orientation of

значения электростатического потенциала поверхности вблизи экстремума, что связано с ростом и распространением внутренних механических напряжений в объеме материала. Следует отметить, что разрушение образца не было достигнуто из-за ограничений хода нагружающего винта.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что метод контактной разности потенциалов может быть применен для бесконтактного неразрушающего выявления локализации деформации, контроля остаточных напряжений, релаксации, например, от времени, скорости и/или значения удельного напряжения и других характеристик полимерных материалов в напряженно-деформированном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zharin, A. L.** Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. In book: Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology / A. L. Zharin. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720.
2. **Жарин, А. Л.** Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А. Л. Жарин. – Минск: Бестпринт, 1996. – 235 с.
3. **Pantsialeveu, K. U.** Design of the contact potentials difference probes [Electronic resource] / K. U. Pantsialeveu, U. A. Mikitsevich, A. L. Zharin // Devices and Methods of Measurements. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15>.
4. Digital contact potential difference probe [Electronic resource] / K. U. Pantsialeveu [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144>.
5. Charge sensitive techniques in tribology studies [Electronic resource] / K. U. Pantsialeveu [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. 2016. – R. 92. – № 11. – P. 239–243. – Mode of access: <https://doi.org/10.15199/48.2016.11.58/>
6. Influence of rapid thermal treatment of initial silicon wafers on the electrophysical properties of silicon dioxide obtained by pyrogenous oxidation / V. Pilipenko [et al.] // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2019. – Vol. 23, iss. 3. – P. 283–290.
7. Scanning Kelvin probe and surface photovoltage analysis of multicrystalline silicon [Electronic resource] / A. Castaldini [et al.] // Materials Science and Engineering. – 2002. – Vol. 91–92. – P. 234–238. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(01\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(01)01018-2).
8. On the use of scanning Kelvin probe for assessing in situ the delamination of adhesively bonded joints [Electronic resource] / B. Andreon

под нагрузкой. Описанные действия повторялись с постоянно увеличивающейся нагрузкой с шагом 1 кгс, что позволило получить зависимость изменения распределения электростатического потенциала поверхности образца от приложенной нагрузки (рис. 4). Регистрация нагружения осуществлялась с помощью тензодатчика, сопряженного с нагружающим винтом.

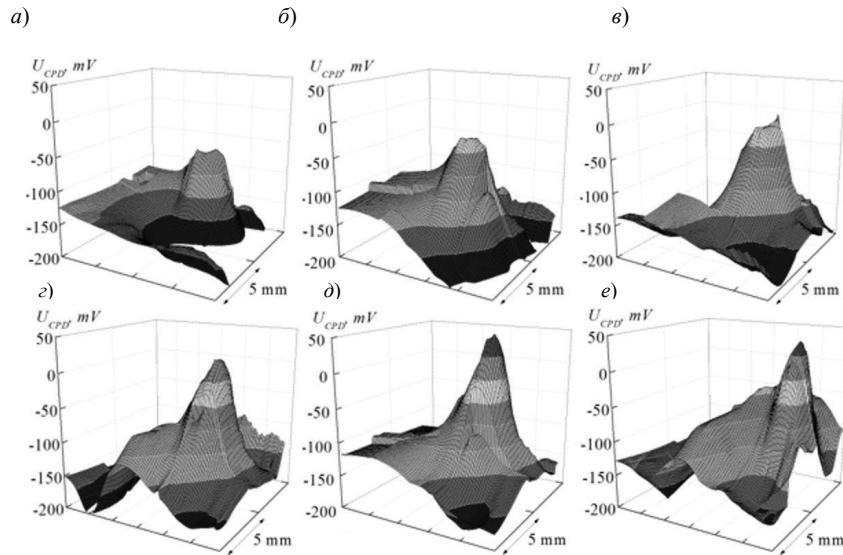


Рис. 4. Карты пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала образца фторопласт-4 при действии внутренних механических напряжений при растяжении: а – около 0 кгс; б – 1 кгс; в – 2 кгс; г – 3 кгс; д – 4 кгс; е – 5 кгс

Как показали исследования, характеры изменения потенциала поверхности и его распределения при растяжении и под действием вакуумного прижима подобны, т. е. в обоих случаях наблюдается локализация потенциала в области действия механических напряжений. Из рис. 4, а видно, что перераспределение электростатического потенциала происходит при минимально возможных удельных нагрузках. С дальнейшим увеличением нагрузки относительное значение электростатического потенциала пропорционально увеличивается, также увеличивается и область локализации.

При удельной нагрузке 4 кгс (см. рис. 4, д) электростатический потенциал поверхности насыщается, т. е. достигает максимального относительного численного значения (около 50 мВ). Последующее увеличение нагрузки приводит к увеличению области и относительного

defects, forecasting the zone and scope of testing of a particular object (zone). For example, the introduction of program-methodical complex PIRATE demonstrated the possibility of using adequate digital model in the process of attestation techniques of eddy current testing of steam generator heat exchanger tubes of NPP with VVER.

Key words: digital finite element models, certification of testing systems, NPP steam generator, eddy current testing, heat exchange tubes.

Современные атомные станции являются сложнейшими техническими объектами с достаточно высокой степенью износа оборудования. Практически единственной возможностью обеспечить работоспособность атомного оборудования, избежать человеческих жертв, а также предотвратить колоссальный экономический и экологический ущерб является создание надежных диагностических систем, предназначенных для оценки технического состояния этого оборудования путем мониторинга опасных зон и отслеживания динамики изменения параметров, свидетельствующих о происходящих изменениях в состоянии, в первую очередь, конструкционных материалов.

В настоящее время при аттестационных испытаниях систем неразрушающего контроля в России необходимо соблюдать жесткие требования ГОСТ Р 50.04.07–2018 [1], где в разделе «Техническое обоснование» проекта аттестуемой методики неразрушающего контроля металла есть обязательный подраздел «Расчетное обоснование», куда должны быть включены результаты расчетов, выполненных в ходе моделирования процедуры функционирования испытуемой диагностической системы. Результаты моделирования должны подтвердить правильность сделанного разработчиками системы выбора параметров контроля, а самое главное – должны иметь возможность спрогнозировать сигнал от постулированных в технических требованиях дефектов с учетом их геометрических и физических характеристик. Кроме того, по результатам моделирования должна быть возможность оценивать влияние местоположения и ориентации этих дефектов на измеряемый сигнал, а также спрогнозировать зону и объем контроля конкретного объекта. При этом к техническому обоснованию должен прилагаться верификационный отчет об использовании расчетной модели с четким указанием диапазонов существующих параметров контроля, для которых они верифицированы.

Например, для систем ультразвукового контроля рекомендованы к использованию (цифровые) модели, позволяющие:

- «вычислять прохождение ультразвуковых волн или акустические поля в элементах сложной геометрии с учетом отражений от постулированных дефектов;
- прогнозировать амплитуды сигналов от постулированных дефектов как функции положения преобразователя;

– прогнозировать прохождение волн или акустические поля в анизотропном и неоднородном материале (в аустенитных или разнородных сварных швах) с учетом отражений от постулированных дефектов;

– продемонстрировать наличие дифрагированных сигналов от дефектов на выбранных уровнях чувствительности для обоснования использования их при определении размеров дефектов».

Наиболее близки к удовлетворению этих требований в использовании цифровой модели для систем ультразвукового контроля работы фирмы ЭХО+ в атомной энергетике [2].

А для систем вихретокового контроля рекомендовано использовать (цифровые) модели, позволяющие:

– «прогнозировать изменение импеданса от постулированных дефектов в зависимости от положения и частоты преобразователя, геометрии объекта контроля и мешающих факторов (отложения, дистанционирующие решетки);

– прогнозировать распределение электрических и магнитных полей в зависимости от материала и геометрии объекта контроля».

На наш взгляд, чтобы удовлетворить всем перечисленным требованиям ГОСТ, необходимо опираться на наиболее современные расчетные технологии, предусматривающие использование как адекватных (в первую очередь, трехмерных) математических моделей конкретных процедур неразрушающего контроля с наименьшими допущениями в геометрии и физических свойствах как объекта контроля, так и задаваемых в них дефектов, а также эффективные технологии анализа измеренных данных.

Кафедра диагностических информационных технологий (прежнее название – кафедра электротехники и интроскопии) НИУ «МЭИ» вот уже более 16 лет сотрудничает с концерном «Росэнергоатом» в решении одной из самых актуальных проблем мировой атомной энергетики – обеспечении высокой эксплуатационной надежности и безопасности теплообменных труб парогенераторов АЭС. Парогенераторы работают в очень напряженных режимах, теплообменные трубы эксплуатируются в условиях больших плотностей энерговыделения, высоких рабочих температур, значительных механических нагрузок, а также в контакте с агрессивными средами. Выход из строя отдельных труб может привести к нанесению ущерба здоровью обслуживающего персонала, большим экономическим потерям от остановки энергоблоков и радиоактивному заражению окружающей среды. Поэтому необходимо систематически контролировать теплообменные трубы во время эксплуатации и вовремя принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций.

Практически безальтернативным методом контроля теплообменных труб является многочастотный вихретоковый метод, который предполагает контроль изнутри теплообменной трубки при сканировании датчиком внутри трубы и считывание сигналов датчиков через каждые 0,2...1,0 мм

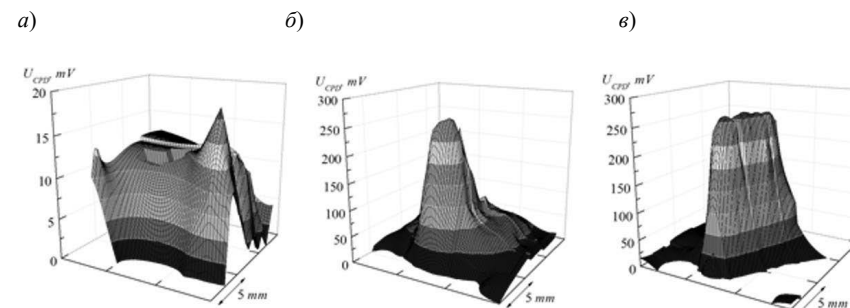


Рис. 2. Карты распределения электростатического потенциала поверхности композитов при внутренних механических напряжениях: а – ПЭВД, наполненный и углеродным (6 % мас.); б – ПЭВД, наполненный углеродным наноматериалом (6 % мас.); в – ПЭВД, наполненный наночастицами диоксида кремния (3 % мас.)

Из результатов исследования можно сделать вывод о влиянии комбинированного наполнителя на механические свойства материала.

Для изучения потенциальных возможностей метода, а также особенностей изменения параметров распределения электростатического потенциала поверхности полимеров под действием механических нагрузок изготовлена система для растяжения образцов (рис. 3) и проведены экспериментальные исследования изменения параметров пространственного распределения электростатического потенциала при растяжении полимерных образцов.

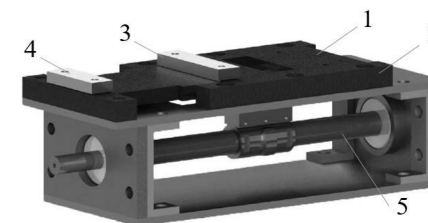


Рис. 3. Система для растяжения полимерных образцов: 1 – подвижное основание; 2 – неподвижное основание; 3, 4 – зажимы, фиксирующие образец; 5 – нагружающий винт

В качестве образцов использован листовой фторопласт-4 толщиной 1 мм. Образцы изготавливались в форме лопаток с узкой областью 5 мм. Они устанавливались в систему растяжения, сопряженную с установкой сканирования электростатических потенциалов, и прикладывалась минимальная нагрузка для выпрямления образца. Затем в режиме сканирования поверхности измеряли электростатический потенциал поверхности образца

были проведены измерения электростатического потенциала поверхности ПЭВД без фиксации (рис. 1, а) и после фиксации к предметному столику через некоторые промежутки времени (рис. 1, в).

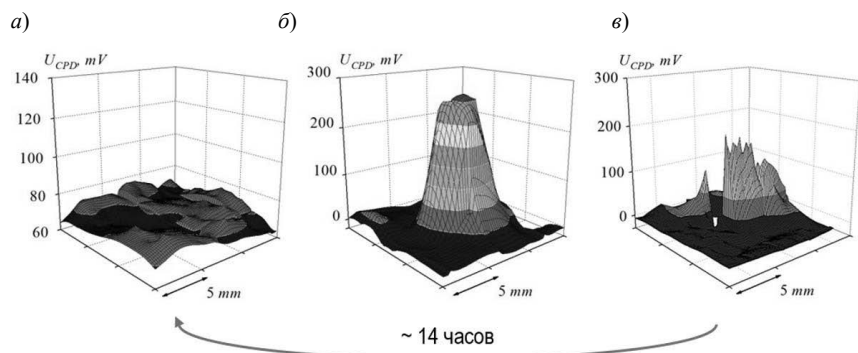


Рис. 1. Карты распределения электростатического потенциала поверхности образца полиэтилена высокого давления: а – без механического воздействия; б – при механическом воздействии; в – через 4 ч после воздействия

Из результатов измерений видно, что воздействие вакуумным прижимом вызывает перераспределение электростатических потенциалов поверхности и их локализацию в области действия механических нагрузок. При этом по большей области образца распределение потенциала однородно в пределах относительных значений от минус 8 до 2 мВ, когда без фиксации образца (см. рис. 1, а) относительные значения потенциала составили около 60...70 мВ. Результаты сканирования образца через 4 ч после воздействия показали снижение относительных значений потенциала в области локализации, а через 14 ч – возврат к состоянию образца, близкому к исходному, как по распределению, так и по относительному значению электростатического потенциала поверхности. Таким образом, контроль параметров распределения электростатического потенциала поверхности позволяет не только выявить области локализации механических напряжений, но и проследить за релаксационными процессами в объеме материала.

Согласно результатам, описанным в [10], для многокомпонентных композитов отклик электростатического потенциала на механическое воздействие вакуумным прижимом не детектировался. Однако дополнительные измерения на образцах композиционного ПЭВД, наполненного только одним из компонентов (углеволокном, углеродным наноматериалом или наноразмерным порошком диоксида кремния), показали локализацию электростатических потенциалов в области действия прижима (рис. 2).

(рис. 1). Ключ к решению проблем в вихретоковом контроле лежит, в частности, в возможности предварительного исследования характера изменения электромагнитного поля в объекте и, соответственно, изменения сигнала дифференциального преобразователя (рис. 2) при возникновении постулированного дефекта, что позволяет судить о достоинствах и недостатках конкретного метода, выбрать оптимальные условия контроля, обоснованно спроектировать конструкцию преобразователя. Все это можно реализовать с помощью цифровой модели на основе метода конечных элементов. Этот метод является лидером среди численных методов, потому что позволяет строго учитывать как сложную геометрию, так и граничные условия, а также имеется возможность построения нерегулярных сгущающихся и разрежающихся сеток.

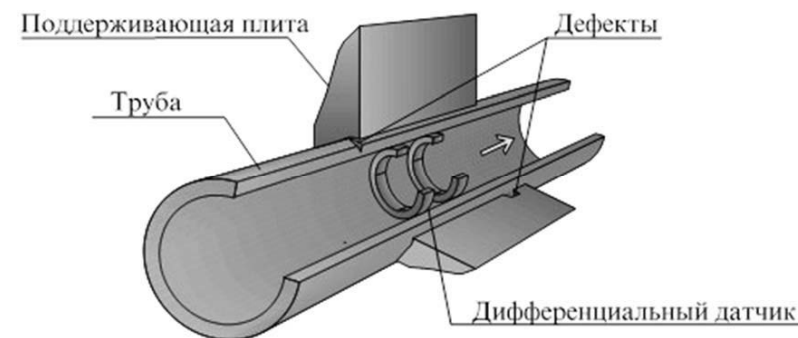


Рис. 1. Схема контроля теплообменных труб парогенераторов АЭС

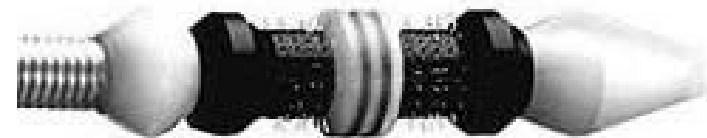


Рис. 2. Дифференциальный вихретоковый преобразователь

Задача вихретокового контроля теплообменных труб специфическая и классический подход к ее решению методом конечных элементов не всегда дает удовлетворительные результаты. Дело в том, что сигналы, обусловленные наличием дефекта в объекте контроля, могут быть на уровне до 1 % от возбуждающего поля. Поэтому любой численный метод в этом случае требует очень больших затрат.

Чтобы иметь возможность решать подобные сложные задачи вихретокового контроля с малым возмущением поля был разработан

двухшаговый алгоритм конечно-элементного моделирования [3], на основе которого был разработан пакет конечно-элементного моделирования электромагнитных полей MagNum3D [4]. В этом алгоритме есть возможность использования оптимальных конечно-элементных сеток как для расчета основного (аппроксимирующего) поля, которое рассчитывается в двумерном варианте (поэтому особых сложностей со временем счета и требуемой памятью нет), так и для анализа поля непосредственно от влияния дефекта.

Теплообменные трубы находятся в парогенераторе в окружении других металлических объектов (мешающих факторов), которые искажают сигнал преобразователя (рис. 3). В первую очередь, это конструктивные элементы, дающие сигналы, которые маскируют сигналы от дефектов, а также эксплуатационные факторы, которые сопровождают процесс получения данных, при этом эти факторы нередко неконтролируемы (например, отложения [5]). Это приводит к тому, что к обработке сигналов, а также к оценке геометрических параметров обнаруживаемых дефектов нужны специальные алгоритмы [6].

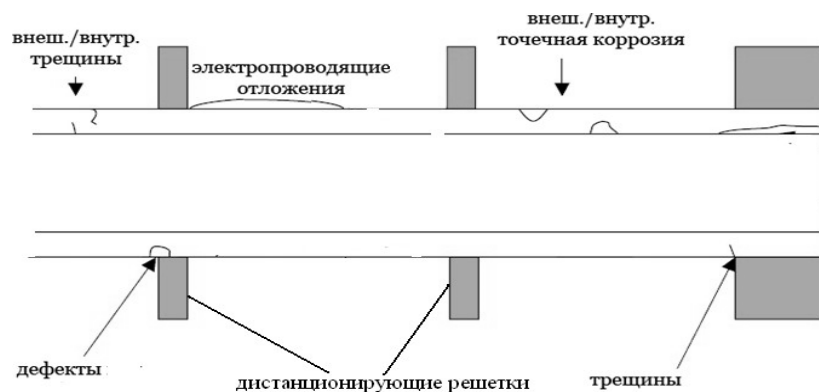


Рис. 3. Контролируемые и мешающие факторы при контроле парогенераторных труб

В работах авторов при решении задачи реконструкции параметров дефекта по экспериментальному сигналу был выбран алгоритмический подход [7]. Задача реконструкции формулируется как задача распознавания образов и сигнал относится к тому или иному классу, принадлежащему к известным типам дефектов. Характерной особенностью является то, что при этом нужна презентативная база сигналов, которая формируется путем расчета сигналов в программе MagNum3D от множества дефектов, изменяющихся по геометрическим параметрам и формам (и определяемые конкретными техническими требованиями). Эта база рассматривается как

физико-химические, структурные и другие характеристики поверхности [1]. Наиболее перспективный метод для бесконтактного измерения поверхностного электростатического потенциала – это метод КРП. Существуют модификации метода КРП, позволяющие проводить измерения непосредственно на воздухе, т. е. без создания каких-либо специфических условий окружающей среды [2]. При этом практическая реализация данных методов относительно проста [3, 4], что позволяет использовать их в совокупности с каким-либо внешним воздействием на материал (например, механическим, температурным, световым и др. [5–7]), в том числе *in situ* [8]. Применение метода КРП для исследования состояния поверхности материалов в литературных источниках встречается в большинстве для металлов и сплавов, в этом случае контролируемым параметром является работа выхода электрона поверхности металла. Проведенные ранее исследования [9, 10] показали, что методы КРП применимы и для исследования полимерных материалов и композитов на их основе. В этом случае контролируемым параметром будет являться собственный и/или приобретенный в результате внешних воздействий электростатический потенциал (заряд) диэлектрика.

Приборы и методы экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводили с использованием системы сканирования электростатических потенциалов, основанной на измерении контактной разности потенциалов вибрирующим зондом [11], разработанной в Белорусском национальном техническом университете. Для механического нагружения образцов система сканирования электростатических потенциалов была оснащена устройством для растяжения полимерных образцов.

Результаты исследований и их обсуждение

Отклик электростатического потенциала поверхности полимерных материалов на внешнее механическое воздействие был обнаружен ранее в работе [10]. В качестве образцов были использованы матричный полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 12203-250 и многокомпонентные композиты на его основе, наполненные углеродным волокном, углеродным наноматериалом (многостенные углеродные нанотрубки диаметром 10...20 нм и примеси металлических частиц катализатора до 5 %), а также наноразмерными частицами диоксида кремния или алюминия (средним диаметром 25 нм). Детектируемые отклонения электростатического потенциала поверхности (аналогично рис. 1, б) были вызваны действием вакуумного прижима, фиксирующего образец на предметном столике сканирующей установки. Для изучения наблюдаемого эффекта

УДК 620.172:620.18

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, А. И. СВИСТУН, В. А. МИКИТЕВИЧ, А. Л. ЖАРИН

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 620.172:620.18

CONTROL OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF POLYMERS BY THE CONTACT POTENTIAL DIFFERENCE TECHNIQUE

K. U. PANTSIALEYEU, A. I. SVISTUN, U. A. MIKITSEVICH, A. L. ZHARIN

Аннотация. В работе приводятся результаты исследований напряженно-деформированного состояния полимерных материалов с помощью сканирующего зонда Кельвина (метод контактной разности потенциалов). Распределение электростатического потенциала измерялось при механическом растяжении полимерных образцов. Показана зависимость распределения и относительного значения электростатического потенциала поверхности от распределения механических напряжений в объеме материала. Метод может быть применен для бесконтактного неразрушающего выявления локализации деформации, контроля остаточных напряжений, релаксации и других параметров материала в напряженно-деформированном состоянии.

Ключевые слова: электростатический потенциал поверхности, напряженно-деформированное состояние, полимерные материалы, контактная разность потенциалов, сканирующий зонд Кельвина.

Abstract. In this paper we report on the stress-deformed state of polymers investigated by means of Scanning Kelvin Probe (Contact Potential Difference Technique). The potential distribution was measured under the influence mechanical strain at the polymer. The dependence of the surface potential distribution and relative quantitative value on the mechanical stress distribution in the volume of material were shown. The method can be applied for non-contact non-destructive detection of deformation localization, control of residual stresses, relaxation and other parameters of the material in the stress-strain state.

Key words: surface potential, stress-deformed state, polymers, Contact Potential Difference, Scanning Kelvin Probe.

Введение

В работе приводятся результаты исследований особенностей изменения пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала образцов из полимеров при механическом растяжении с использованием метода контактной разности потенциалов (КРП) в режиме сканирования поверхности (сканирующий зонд Кельвина).

Электростатический потенциал поверхности материалов является универсальным параметром, характеризующим физико-механические,

обучающая выборка для обучения автоматической системы, в основе которой заложен алгоритм распознавания.

Таким образом, методика проектирования системы классификации для вихретокового контроля парогенераторных труб включала этапы:

- создания конечно-элементной модели;
- исследования влияния на сигнал мешающих факторов с тем, чтобы найти оптимальные способы отстройки от них;
- формирования банка сигналов, содержащего, помимо полученных на цифровой модели, сигналы от искусственных (лабораторных) дефектов, а также от реальных дефектов;
- разработки алгоритмов предварительной обработки и алгоритмов отстройки от мешающих факторов;
- формирования оптимального набора признаков;
- разработки автоматизированного классификатора.

Эксплуатационными факторами при контроле труб являются:

- изменение толщины стенки, что связано с особенностью производства теплообменных труб в России (pilger-проблема);
- наличие ряда конструктивных элементов;
- наличие гибов и электропроводящих и/или магнитных отложений.

Все разработанные алгоритмы были реализованы в программе PIRATE [8], которая ориентирована на прием и обработку экспериментальных данных контроля от любого из дефектоскопов, аттестованных в атомной энергетике России. Программа включает в себя модуль сбора и расшифровки сигналов, а также модули алгоритма автоматической обработки, предполагающего выполнение последовательности действий, приведенных на рис. 4.

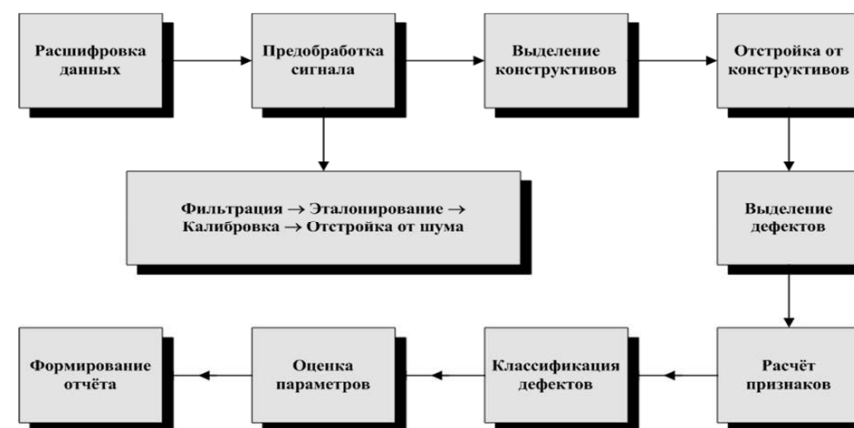


Рис. 4. Структура программного комплекса PIRATE

Программное обеспечение PIRATE прошло аттестационные испытания [9] еще до появления ГОСТ Р 50.04.07–2018. Сначала были проведены приемочные испытания, цель которых – проверка выявляемости дефектов при многократной подаче в случайном порядке специально изготовленных образцов с реалистичными дефектами в измерительную систему с аттестованной аппаратурой. При этом использовался в случайном же порядке макет дистанционирующей решетки. Результат – средняя выявляемость и достоверность по всем дефектам удовлетворяет критериям, установленным в нормативных документах.

После приемочных испытаний были проведены опытно-промышленные испытания, цель которых – сопоставить результаты анализа экспериментальных данных, полученные экспертами в штатном режиме, с результатами работы программы PIRATE. Была использована штатная система контроля на основе дефектоскопа Harmonic, исследовались трубы одного из самых старых парогенераторов – 3-го на 1-м блоке АЭС с ВВЭР-440. Было проверено около 3500 труб, результаты удовлетворяют установленным Программой опытно-промышленной эксплуатации критериям.

Основные выводы. Подчеркнута необходимость наличия адекватных цифровых моделей, способных удовлетворить строгим требованиям ГОСТ Р 50.04.07–2018 с точки зрения технического обоснования при аттестации разрабатываемой конкретной методики неразрушающего контроля.

Предложена цифровая модель для решении актуальной задачи вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов АЭС на основе использования трехмерного конечно-элементного анализа поля и эффективных алгоритмов анализа сигналов и оценки геометрических параметров дефектов.

Описана технология проектирования систем классификации и параметризации дефектов, включая эффективный алгоритм компенсации влияния основных мешающих факторов (конструктивных элементов парогенератора и пыльгер-шума) на сигнал от дефекта.

Автоматизированный классификатор дефектов по результатам вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов АЭС (программа PIRATE) успешно прошел испытания в режиме штатного контроля и продемонстрировал при этом ряд преимуществ над стандартными программами по возможности работать полностью в автоматическом режиме, оценивать осевую длину дефектов и ряду метрологических характеристик.

значительное снижение уровня водопроницаемости, это следует учитывать при конфекционировании материалов, выбирая материалы с «запасом» водопроницаемости. Наиболее стабильной структурой по результатам исследований следует считать 2,5-слойную структуру мембранных композиционных материалов, характеризующуюся наличием тканой текстильной основы и комбинированной гидрофобно-гидрофильной мембраны, а также 2-слойную структуру с поровой гидрофобной мембраной.

Разработанная методика позволяет в относительно короткие сроки выполнить прогнозирование свойств мембранных текстильных материалов при моделировании условий эксплуатации на образцах малого размера, что позволяет обосновать выбор материалов для одежды конкретного назначения, обладающей стабильным уровнем водопроницаемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Буркин, А. Н.** Эксплуатационные свойства текстильных материалов: монография / А. Н. Буркин, А. Н. Махонь, Д. К. Панкевич. – Витебск: ВГТУ, 2018. – 218 с.
2. **Панкевич, Д. К.** Водонепроницаемость текстильных материалов. Разработка методики и прибора для исследования / Д. К. Панкевич, А. Н. Буркин // Стандартизация. – 2016. – Вып. 4. – С. 52–59.
3. Проектирование накладки для флексометра методом скоростного прототипирования / В. П. Довыденкова [и др.] // Материалы докладов 53-й Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, Витебск, 22 апр. 2020 г. – Витебск: ВГТУ, 2020. – Т. 2. – С. 135–137.

E-mail: www.dashapan@mail.ru.

Результаты эксперимента в виде гистограммы относительной водопроницаемости представлены на рис. 2. По результатам исследования выявлено, что одиннадцать образцов из двадцати шести полностью утратили свои водозащитные свойства. Из них 8 образцов в структуре мембранного слоя содержат гидрофильный полимер. Образцы 2-слойной структуры (черные столбики на рис. 2), имеющие в своём составе тканую текстильную основу и однокомпонентную мембрану, разделились на две группы. Все материалы с гидрофильной мембраной потеряли свойство водонепроницаемости, а остальные образцы, содержащие поровую гидрофобную мембрану, сохранили от 40 до 100 % начального уровня водопроницаемости.

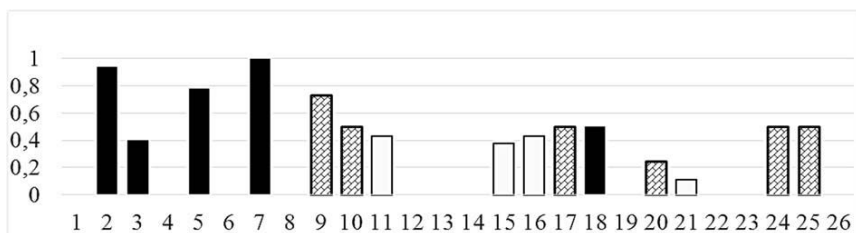


Рис. 2. Относительная водопроницаемость образцов материалов

Образцы 2,5-слойной структуры (узорчатые столбики на рис. 2) сохранили от 50 до 73 % начального уровня водопроницаемости и показали только 1 нулевой результат. При этом образцы, поверхность мембраны которых модифицирована микрочастицами, проявили самый низкий уровень относительной водопроницаемости в исследуемой группе. Очевидно, модифицирование поверхности мембраны микрочастицами не является однозначным признаком улучшения эксплуатационных свойств мембранных текстильных материалов, а в некоторых случаях играет роль привлекательного для потребителя дополнения.

Образцы материалов 3-слойной структуры (серые столбики на рис. 2) показали наиболее значительное снижение уровня водопроницаемости: из восьми образцов четыре утратили водонепроницаемость, у оставшихся образцов уровень водопроницаемости снизился на 60 % и более.

Анализ результатов исследования позволил установить, что для изготовления зимних курток не стоит выбирать мембранные текстильные материалы с поровым гидрофильным мембранным полиэфируретановым слоем и материалы 3-слойной структуры, поскольку их уровень водопроницаемости нестабилен в условиях эксплуатации, что равносильно утрате потребительской ценности одежды. Воздействие низких температур совместно с циклическим изгибом у мембранных материалов вызывает

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 50.04.07–2018.** Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме испытаний. Аттестационные испытания систем неразрушающего контроля. – Москва: Стандартинформ, 2018.
2. **Вопилкин, А. Х.** Современные автоматизированные средства и методы ультразвукового контроля сварных соединений оборудования и трубопроводов реакторных установок типа ВВЭР / А. Х. Вопилкин, Д. С. Тихонов // Современные методы и приборы контроля: материалы VI Международ. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 74–86.
3. **Лунин, В. П.** Проектирование программно-алгоритмических средств для систем электромагнитного контроля энергетического оборудования / В. П. Лунин. – Москва: МЭИ, 2016. – 196 с.
4. Программа конечно-элементного моделирования MagNum3D: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611345 / В. П. Лунин, А. Г. Жданов. – Оpubл. 28.03.2007.
5. Выявление и оценка объема отложений на теплообменных трубках парогенераторов АЭС по эксплуатационным данным штатного вихретокового контроля / А. А. Столяров, В. П. Лунин, А. Г. Жданов, Е. Г. Щукис // Теплоэнергетика. – 2020. – № 2. – С. 62–71.
6. **Лунин, В. П.** Алгоритмическое обеспечение для надежного выявления дефектов теплообменных труб / В. П. Лунин, А. Г. Жданов // Вестн. МЭИ. – 2015. – № 2. – С. 114–122.
7. **Лунин, В. П.** Феноменологические и алгоритмические методы решения обратных задач электромагнитного контроля / В. П. Лунин // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 3–16.
8. Программа анализа данных вихретокового контроля PIRATE: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611344 / В. П. Лунин, А. Г. Жданов, Е. Г. Щукис, Д. Ю. Лазуткин. – Оpubл. 28.03.2007.
9. Предэксплуатационные испытания программы PIRATE на выявление и оценку глубины дефектов теплообменных труб парогенераторов АЭС / А. Г. Жданов, В. П. Лунин, А. А. Столяров, Е. Г. Щукис // Теплоэнергетика. – 2020. – № 8. – С. 29–36.
10. Критерий глушения теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР по результатам вихретокового контроля / В. П. Лунин, А. Г. Жданов, В. В. Чегодаев, А. А. Столяров // Теплоэнергетика. – 2015. – № 5. – С. 33–38.

E-mail: LuninVP@mpei.ru; Zhdanov.Andrew82@gmail.com.

УДК 620.192

**ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ
НА ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ****Н. И. МУРАШКО, Д. В. ГОЛУБЦОВ, К. А. РОМАНОВИЧ**

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

UDC 620.192

**REMOTE DETECTION OF EMERGENCIES ON UNDERGROUND
PIPELINES****N. I. MURASHKO, D. V. GOLUBTSOV, K. A. ROMANOVICH**

Аннотация. Дистанционное обнаружение дефектов трубопроводов, включая сварные швы, представляет собой направление неразрушающего контроля, которое используется для оперативного обнаружения аварийных ситуаций на протяженных объектах теплоэнергетики, нефтехимической и газовой отраслей.

Рассмотрены методы дистанционного обнаружения дефектов магистральных трубопроводов по данным воздушного мониторинга в видимом, ближнем и среднем (тепловом) инфракрасном диапазонах электромагнитных волн. Представлены требования к средствам обнаружения аварийных ситуаций на подземных трубопроводах по данным многоканальной спектральной авиационной съемки.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, магистральный трубопровод, сварные швы, многоканальная спектральная съемка, авиационный мониторинг.

Abstract. Remote detection of pipeline defects, including welding seams, is a direction of non-destructive testing, which is used for the rapid detection of emergency situations at extended facilities of the heat power, petrochemical and gas industries.

Modern methods of remote detection of defects in trunk pipelines based on air monitoring data in the visible, near and middle (thermal) infrared ranges of electromagnetic waves are considered. The requirements for the means of detecting emergency situations on underground pipelines based on the data of multichannel spectral aviation survey are presented.

Key words: non-destructive testing, main pipeline, welding seams, multichannel spectral survey, aviation monitoring.

Введение

К неразрушающим методам контроля объектов относятся контроль внешним осмотром и различные виды дефектоскопии. Так, для выявления дефектов сварных швов трубопроводов в процессе их создания используются рентгеновские и гамма-излучения, ультразвук, магнитные методы дефектоскопии и др. В процессе эксплуатации возможности обнаружения дефектов трубопроводов, включая сварные швы, которые являются причинами утечки природного газа, нефти и нефтепродуктов, горячей воды, ограничены не только техническими, но и экономическими факторами. Одной из причин этого является то, что трубопроводы

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
6	ПА	—	п	—	147	Тканая основа комбинированного переплетения	2
7	ПЭ	п	—	—	116	Тканая основа комбинированного переплетения	2
8	ПЭ/ПЭ	—	м	—	148	Трикотажная основа и подкладка (ластик)	3
9	ПЭ	п	м	—	107	Тканая основа комбинированного переплетения	2,5
10	ПЭ	п	м	—	139	Тканая основа комбинированного переплетения	2,5
11	ПА/ПЭ	п	—	—	286	Тканая основа полотняного переплетения и подкладка из ворсового трикотажного полотна	3
12	ПА/ПЭ	п	—	—	202	Основа и подкладка из трикотажного полотна	3
13	ПЭ	—	п	мод	180	Тканая основа полотняного переплетения	2,5
14	ПЭ/ПЭ	п	—	—	279	Трикотажная основа (ластик) и подкладка	3
15	ПА/ПЭ	п	—	—	295	Трикотажная основа (ластик) и подкладка из ворсового трикотажного полотна	3
16	ПЭ/ПЭ	п	—	—	298	Трикотажная основа и подкладка (ластик)	3
17	ПЭ	п	м	—	117	Тканая основа комбинированного переплетения	2,5
18	ПЭ	п	—	—	137	Тканая основа полотняного переплетения	2
19	ПЭ/ПА	п	—	—	121	Тканая основа комбинированного переплетения и подкладка из основовязаного трикотажного полотна	3
20	ПЭ	—	п	мод	187	Тканая основа полотняного переплетения	2,5
21	ПЭ/ПЭ	п	—	—	143	Тканая основа и подкладка полотняного переплетения	3
22	ПЭ	п	м	—	189	Тканая основа полотняного переплетения	2,5
23	ПЭ	п	м	—	210	Тканая основа полотняного переплетения	2,5
24	ПЭ	п	м	—	189	Тканая основа полотняного переплетения	2,5
25	ПЭ	п	м	—	189	Тканая основа полотняного переплетения	2,5
26	ПЭ/ПЭ	—	п	—	210	Тканая основа и подкладка полотняного переплетения	3

Примечание – * **п** – поровый, **м** – монолитный, **мод** – с модифицированной микрочастицами мембраной

Апробация методики проведена в условиях испытательной лаборатории кафедры «Техническое регулирование и товароведение» УО «ВГТУ». Исследовали 26 артикулов мембранных текстильных материалов производства фирм «Taslan», «Hiroga», «Ultrex» (Республика Корея), «SportchiefR» (Канада) и «Моготекс» (Республика Беларусь). Предлагаемая область применения – материалы верха для зимних курток.

Характеристика исследуемых образцов представлена в табл. 1. Исследовали 2-слойные, 2,5-слойные (с комбинированной мембраной) и 3-слойные мембранные текстильные материалы. Мембранный слой у всех объектов исследования выполнен из полиэфируретана с различными добавками. Пять образцов 2-слойной структуры имеют поровый гидрофобный мембранный слой, три образца – поровый гидрофильный. Два образца имеют модифицированную микрочастицами поверхность мембраны, что по данным производителя позволяет повысить устойчивость материалов к атмосферным, многоцикловым механическим и температурным воздействиям, увеличить прочность. Комбинированный мембранный слой образцов 2,5-слойной структуры состоит из порового гидрофобного и тонкого монолитного гидрофильного слоев. Текстильные слои всех исследуемых образцов – ткани и трикотажные полотна различных переплетений, выработанные из мультифиламентных химических нитей. Образцы подвергали 30 000 циклов изгиба при температуре минус 15 °С и влажности 0 %, моделируя среднестатистические условия эксплуатации зимних утепленных курток.

Табл. 1. Характеристики исследуемых образцов материалов

Но- мер об- раз- ца	Сырье- вой состав текс- тильных слоев: основа / подклад- ка	Мембранный слой*			Повер- хностн ая плотно- сть, г/м ²	Характеристика текстильных слоев	Ко- ли- чест- во слоев
		Гид- рофоб- ный ПУ	Гид- рофиль- ный ПУ	Мик- рочас- тицы			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ПЭ	–	п	–	217	Тканая основа саржевого переплетения	2
2	ПА	п	–	–	152	Тканая основа саржевого переплетения	2
3	ПЭ	п	–	–	140	Тканая основа полотняного переплетения	2
4	ПЭ	–	п	–	142	Тканая основа полотняного переплетения	2
5	ПЭ	п	–	–	103	Тканая основа комбинированного переплетения	2

покрываются гидроизоляцией и укладываются под землю на глубину от 0,8 до 1,0 м.

Принимая во внимание, что трубопроводы являются протяженными объектами, экономически целесообразно применять дистанционные методы обнаружения в реальном времени мест утечки транспортируемых газообразных и жидких веществ. При этом возникает проблема автоматического обнаружения факта утечки продукта и точного измерения координат места его утечки. Здесь под дистанционным обнаружением понимается автоматическая регистрация с борта летательного аппарата прямых и/или косвенных причин, вызванных дефектами трубопровода.

1 Дистанционное обнаружение дефектов подземных трубопроводов.

Далее рассматриваются прямые и косвенные признаки, по которым дистанционно обнаруживаются дефекты трубопроводов при транспортировке жидких и газообразных продуктов: нефть и нефтепродукты (нефтепровод), природный газ (газопровод) и теплая вода (теплосеть).

При утечке природного газа, вызванной дефектом сварного шва, наблюдается эффект дросселирования – понижение давления газа при его протекании через узкую щель канала трубопровода. Дросселирование реального газа обычно сопровождается изменением его температуры. Если температура природного газа перед дросселированием меньше температуры инверсии, то при дросселировании газ будет охлаждаться. Вследствие дросселирования температура газа в магистральных газопроводах может опускаться ниже температуры окружающей среды. Обнаружение факта и места утечки природного газа возможно в процессе синхронной съемки местности в среднем инфракрасном (тепловом) и видимом диапазонах.

При аварии на нефтепроводе на поверхности земли и водоема возникают темные нефтяные пятна, которые могут быть обнаружены в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Утечка нефти в местах, где имеет место растительность, может быть обнаружена по косвенным признакам. Экспериментально установлено [1], что при содержании нефти в верхних горизонтах почв в диапазоне 10...40 % угнетение древостоя и подроста может составлять 30...90 %, и даже через 15 лет после загрязнения продолжается процесс отмирания древостоя. При содержании в органогенном горизонте более 40 % нефти происходит полная гибель растительности через 2–3 года после разлива, причем основная ее часть отмирает уже в первый год.

На водной поверхности при штиле 1 м³ нефти за 10 мин растекается пятном площадью около 1800 м² при средней толщине слоя 100 мкм. В случае волнения 1 т нефти загрязняет поверхность воды площадью

до 10...12 км², а нефтяные масла распространяются на расстояние до 300 км от места разлива [2].

При аварии на теплотрассе индикатором утечки горячей воды является тепловая аномалия, которая может быть обнаружена с помощью тепловизора. Синхронная тепловая аэросъемка совместно с видеосъемкой позволяет оперативно обследовать большие площади городской постройки и с высокой достоверностью определить участки тепловой аномалии, вызванной аварией подземного теплотрассы.

2 Проблемы получения данных дистанционного обнаружения последствий дефектов подземных трубопроводов.

Оперативное обнаружение дефектов трубопроводов, включая швы, выполняется по данным геодезически привязанной синхронной цифровой авиационной съемки местности в спектральных диапазонах электромагнитных волн. В зависимости от решаемых задач предъявляются требования к спектральным цифровым камерам многоканального аэросъемочного комплекса, среди которых необходимо отметить угол зрения, пространственное, спектральное и временное разрешение, а также требования к точности определения пространственной ориентации камер в момент съемки. В состав комплекса должны входить спектральные цифровые фотокамеры видимого RGB, ближнего NIR и среднего SWIR диапазонов, модуль измерения высоты съемки, гиросtabilизированная платформа (подвес), модуль позиционирования на базе приемника спутниковой навигации (ГЛОНАСС, GPS), бортовой вычислительный комплекс и комплексы передачи данных наблюдения и дистанционного управления цифровыми средствами съемки. При этом дальность передачи данных с борта летательного аппарата на наземный пункт управления должна быть не менее 100 км.

При проектировании авиационного многоканального спектрального комплекса (МСК) необходимо учитывать экономический эффект от его эксплуатации с учетом рисков, связанных с возможной жесткой посадкой беспилотного летательного аппарата (БЛА), при которой часть оборудования может быть повреждена или уничтожена.

Высота съемки может находиться в пределах от 30 до 1000 м. Стоимость получения качественного цифрового снимка местности площадью 1 км² зависит от высоты съемки, пространственного разрешения и угла обзора цифровой фотокамеры. На практике целесообразно использовать объектив фотокамеры, имеющий угол зрения 60°. Для обнаружения мест утечек газообразных и жидких веществ из трубопроводов пространственное разрешение снимков, полученных с высоты 1000 м, должно быть не хуже 0,2 м. Для снижения стоимости съемки трасс протяженных объектов с разных высот целесообразно использовать

закрепляют винтом. Свободный конец образца выворачивают лицевой поверхностью наружу и без натяжения и деформации закрепляют в неподвижном зажиме. Фото элементарной пробы, правильно заправленной в зажимы флексометра, представлено на рис. 1, а. Для исключения повреждения образцов при исследовании материалов толщиной менее 0,6 мм необходимо на подвижные зажимы флексометра установить пластиковые накладки, разработанные в УО «ВГТУ» (рис. 1, б) [3]. На пульте управления климатической камерой задают температуру и влажность испытания, соответствующие условиям эксплуатации материалов, а когда в рабочем объеме камеры установятся заданные параметры, включают флексометр и отмечают время начала испытания.

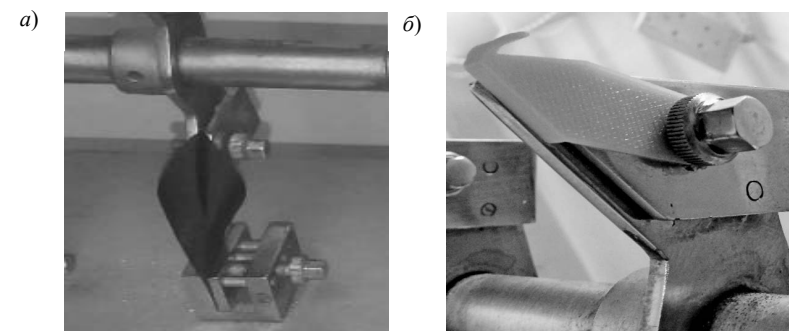


Рис. 1. Фото элементов: а – проба в зажимах флексометра; б – накладка на зажим для тонких материалов

Испытание заканчивают по истечении времени, обеспечивающего заданное количество циклов изгиба. После окончания испытаний образцы вынимают из зажимов установки и проводят повторное измерение водопроницаемости в центральной части элементарной пробы. Записывают результаты измерения в протокол испытаний.

Относительную водопроницаемость после определенного количества циклов вычисляют по формуле

$$B_{\text{отн}} = \frac{B_i}{B_0}, \quad (1)$$

где B_i – среднее арифметическое значение водопроницаемости материала после i циклов испытаний, МПа; B_0 – среднее арифметическое значение водопроницаемости материала до испытания, МПа.

В рамках выполнения задания по Государственной программе научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» в УО «ВГТУ» разработана методика, позволяющая прогнозировать стабильность уровня водопроницаемости мембранных материалов при эксплуатации. Методика может быть использована при контроле качества мембранных текстильных материалов для одежды и обуви и устанавливает общие требования к проведению испытаний на стабильность уровня водопроницаемости при многократном изгибе и различных температурно-влажностных воздействиях.

Для реализации методики применяются следующие средства измерений, испытательное и вспомогательное оборудование: гигрометр психометрический с диапазоном измерений от 30 до 80 % влажности и от 0 до 40 °C температуры, с ценой деления 0,2 °C; линейка металлическая измерительная с пределом измерения не менее 500 мм с ценой деления 1 мм; портативный прибор для определения водопроницаемости текстильных материалов методом высокого гидростатического давления [2]; флексометр типа ИПК-2М, установленный в климатической камере УТН-408-40-1Р.

Используемый метод заключается в измерении водопроницаемости материала, моделировании циклического изгиба при создании определенных климатических условий в течение определенного времени и оценке изменения уровня водопроницаемости материала после снятия нагрузки.

При выполнении измерений в лаборатории должны быть соблюдены следующие условия: температура окружающего воздуха (20 ± 2) °C; относительная влажность воздуха (65 ± 5) %.

Для испытания в качестве образцов могут применяться точечные пробы материалов, отобранные в соответствии с ГОСТ 20566–75 *Ткани и штучные изделия текстильные. Правила приемки и метод отбора проб*. На участках образцов, подвергаемых гидростатическому давлению, не должно быть дыр, проколов, негерметизированных ниточных соединений и дефектов покрытия, определяемых визуально. Начальный уровень водопроницаемости измеряют, не вырезая элементарных проб, не менее чем в трех точках точечной пробы, при разногласиях – не менее десяти.

После измерения начального уровня водопроницаемости вырезают элементарные пробы из участков точечной пробы, на которых не проводилось измерение водопроницаемости. Элементарные пробы должны быть прямоугольной формы размером 50 × 90 мм. Количество элементарных проб должно быть не менее трех, при разногласиях – не менее десяти. Образцы высушивают, выдерживая в развернутом виде не менее 24 ч при относительной влажности воздуха (65 ± 4) % и температуре воздуха (20 ± 2) °C.

Элементарные пробы зажимают в зажимах флексометра следующим образом: образец сгибают вдоль средней линии лицевой поверхностью внутрь и один конец образца вставляют до упора в подвижный зажим и

объективы с переменным фокусным расстоянием. В процессе съемки возникает проблема управления системой цифровых камер МСК.

При обнаружении косвенных признаков утечки нефти используются снимки, полученные в красном и ближнем инфракрасном диапазонах [3]. Спектральное разрешение камеры зависит от характеристик оптического фильтра, который устанавливается на её объектив.

Авиационная съемка может осуществляться при изменении освещенности местности в пределах от 100 до 100000 люкс. Параметров экспозиции фотокамеры всего три: диафрагма, выдержка и светочувствительность. При использовании одной фотокамеры параметры экспозиции устанавливаются автоматически. Одномоментная съемка местности двумя и более цифровыми камерами не предполагает автоматическую экспозицию: диафрагма и выдержка камер устанавливается заранее. В этом случае цифровая камера формирует снимки 32-битной разрядности без потери информации. Проблема возникает при автоматическом преобразовании 32-битных изображений в 8-битные, тематическая обработка которых выполняется стандартными средствами.

Необходимо учитывать проблему одномоментной многоканальной съемки, при которой относительное время задержки срабатывания затворов цифровых фотокамер должно быть постоянным и не должно быть размытия (смаза) изображения, которое зависит от скорости летательного аппарата – носителя МСК.

В 2017 г. в рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» создан многоканальный гиросtabilизированный авиационный комплекс дистанционного наблюдения АПК «Спектр», который обеспечивает оперативное получение спектральных снимков видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазонов [4]. Технические характеристики АПК «Спектр» соответствуют лучшим иностранным образцам: UltraCam Eagle (США), A3 Edge (Израиль), CS-15000 (Канада), Quattro DigiCAM (Германия). АПК «Спектр» позволяет обнаруживать прямые и косвенные признаки возникновения дефектов трубопроводов, по которым транспортируется природный газ, нефть и горячая вода. К недостаткам АПК «Спектр» следует отнести отсутствие возможности обнаруживать дефекты трубопровода в реальном времени, а также весовые и габаритные характеристики, которые не позволяют установку его на современных беспилотных летательных аппаратах. Общий вид АПК «Спектр» представлен на рис. 1.

Заключение

Сложность получения достоверной информации о состоянии линейной части магистральных трубопроводов обусловлена специфичностью самого объекта контроля. Значительная протяженность и малодоступность не

позволяют полноценно использовать хорошо известные в промышленности методы неразрушающего контроля. В настоящее время перспективными являются методы и средства дистанционного обнаружения аварийных участков магистральных трубопроводов по данным воздушного мониторинга в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах электромагнитных волн.

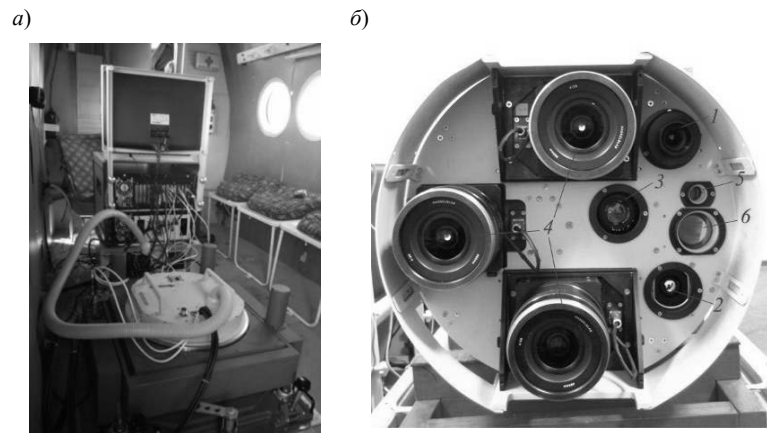


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс «Спектр»: а – общий вид на борту самолета Ан-2; б – многоканальная спектральная фотокамера

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ходжаева, Г. К.** Оценка риска аварийности нефтепроводных систем в аспекте геодинамических процессов: монография / Г. К. Ходжаева. – Нижневартовск: Нижневарт. гос. ун-т, 2016. – 132 с.
2. **Яковлев, В. С.** Хранение нефтепродуктов. Проблемы защиты окружающей среды / В. С. Яковлев. – Москва: Химия, 1987. – 151 с.
3. **Андреев, А. В.** Обнаружение последствий чрезвычайных ситуаций по данным авиационного мониторинга / А. В. Андреев, Н. И. Мурашко, К. А. Романович // Материалы VII Белорус. космического конгресса. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2017. – Т. 2. – С. 99–102.
4. **Мурашко, Н. И.** О совершенствовании системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / Н. И. Мурашко, А. В. Андреев, В. М. Станкевич // Вестн. УГЗ. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 90–96.

УДК 677.017.8

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ МЕМБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Д. К. ПАНКЕВИЧ, А. Н. БУРКИН, Е. И. ИВАШКО

Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь

UDC 677.017.8

METHODS FOR STUDYING WATER PERMEABILITY OF MEMBRANE MATERIALS WHEN SIMULATING OPERATING CONDITIONS

D. K. PANKEVICH, A. N. BURKIN, E. I. IVASHKO

Аннотация. С появлением новых материалов появляется потребность в исследовании и прогнозировании их свойств. Статья посвящена разработке методики исследования водопроницаемости новых композиционных мембранных текстильных материалов при моделировании условий эксплуатации. Разработанная методика позволяет выполнить прогнозирование стабильности уровня водопроницаемости мембранных текстильных материалов для одежды и обуви при одновременном воздействии многоциклового изгиба и различных температурно-влажностных условий на образцах малого размера.

Ключевые слова: методика, водопроницаемость, мембранные материалы, моделирование условий эксплуатации, морозостойкость.

Abstract. With the advent of new materials, there is a need for research and prediction of their properties. The article is devoted to the development of a method for studying the water permeability of new composite membrane textile materials when simulating operating conditions. The developed technique makes it possible to predict the stability of the level of water permeability of membrane textile materials for clothing and footwear under the simultaneous action of multi-cycle bending and various temperature and humidity conditions on small samples.

Key words: technique, water permeability, membrane materials, modeling of operating conditions, frost resistance.

Среди текстильных материалов, обладающих высоким уровнем водозащитных свойств, выделяются композиционные водонепроницаемые материалы, имеющие в своем составе мембранный полимерный слой. В процессе эксплуатации изделий из мембранных текстильных материалов происходит значимое изменение их свойств. Известно, что наиболее существенные изменения претерпевают материалы при одновременном воздействии пониженных температур и трения, многократного изгиба, растяжения: слоистые материалы расслаиваются, образуются микротрещины слоев, уровень водопроницаемости снижается [1].

8. **Астахов, В. И.** К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом / В. И. Астахов, Э. М. Данилина, Ю. К. Ершов. – Дефектоскопия. – 2018. – № 3. – С. 39–49.

9. **Ферстер, Ф.** Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины / Ф. Ферстер. – Дефектоскопия. – 1984. – № 12 – С. 13–18.

10. **Павлюченко, В. В.** Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.

11. **Pavlyuchenko, V. V.** Using magnetic hysteresis for testing electroconductive objects in pulsed magnetic fields / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich. – Russ. J. Nondetr. Test. – 2013. – Vol. 49, № 6. – P. 334–346.

12. **Pavlyuchenko, V. V.** Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov. – Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, № 2. – P. 121–127.

13. **Павлюченко, В. В.** Обнаружение протяженных дефектов сложной формы в токопроводящих пластинах с помощью магнитного носителя / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 31–38.

14. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 12. – С. 56–63.

15. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция магнитного поля перемещаемого линейного индуктора / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 51–60.

УДК 621.12

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

И. А. ОСАДЧИЙ, В. А. ЛИПНИЦКИЙ

Военная академия Республики Беларусь
Минск, Беларусь

UDC 621.12

FORMATION OF DIAGNOSTIC PARAMETERS ON BASIS OF ANALYSIS OF INERTIAL AXIS OF SHAFT'S ROTATION

I. A. OSADCHIY, V. A. LIPNITSKY

Аннотация. В работе дано обоснование использования приведенного мгновенного центра вращения для диагностирования машин с вращающимися элементами. Предложен новый способ получения диагностических параметров объекта на основе анализа динамики инерциальной оси вращения вала в его поперечной плоскости. Перечислены преимущества оценки вибрационного состояния объекта на основе анализа динамики его приведенного мгновенного центра вращения.

Ключевые слова: диагностический параметр, инерциальная ось, мгновенный центр вращения.

Abstract. In work justification of use of the given instant center of rotation for diagnosing of cars with the rotating elements is given. The new way of obtaining diagnostic parameters of an object on basis of dynamics's analysis of an inertial axis of shaft's rotation in its orthogonal plane is offered. Advantages of assessment of an object's vibration condition on basis of its dynamics's analysis given instant center of rotation are listed.

Key words: diagnostic parameter, inertial axis, instant center of rotation.

Введение

Методы вибродиагностики нашли наиболее широкое применение для машин с вращающимся ротором. Различные дефекты элементов этих изделий проявляются по-разному, поэтому диагностические технологии должны быть «избыточными» в отношении применения комплекса различных по физической сути методов и приемов неразрушающего контроля, которые бы дополняли друг друга для обеспечения максимальной гарантии качества изделия [1].

Информацию о техническом состоянии объектов получают по параметрам выходных сигналов датчиков вибраций. Достоинства и недостатки наиболее распространенных методов исследования вибраций достаточно полно рассмотрены в [2, 3].

В [2, 4, 5] показано, что многие задачи вибродиагностики решаются с помощью графических представлений параметров вибраций. Одним из таких графических представлений является орбита вращения вала, которая

достаточно хорошо характеризует изменение положения оси вращения вала [6]. Один из недостатков графика орбиты вала связан с тем, что при его построении не учитывается разница моментов инерции в разных контрольных точках и вдоль параллельных осей чувствительности датчиков. Это приводит к искажению реальной орбиты вала и, как следствие, к ошибкам диагностирования. Кроме того, вектор виброперемещений, как линейная характеристика движения, не в полной мере характеризует кинетическую энергию вращательного движения вала. Поэтому с целью устранения указанных недостатков в данной работе предлагается новый способ получения диагностических параметров объекта на основе анализа динамики инерциальной оси вращения вала в его поперечной плоскости.

Обоснование предлагаемого представления вибраций

Из теоремы Эйлера о конечном перемещении следует, что произвольное движение закрепленного в некоторой точке твердого тела в каждый момент времени движения может быть представлено как вращение этого тела вокруг мгновенной оси, проходящей через данную точку [7]. При сложном движении твердого тела его полная кинетическая энергия может быть представлена как сумма кинетической энергии поступательного и вращательного движений [8]. С учетом теоремы Эйлера полную кинетическую энергию представим как сумму кинетической энергии вращательного движения и кинетической энергии вращательного движения, вызванного поступательным:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} = \frac{m(\omega_n r)^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} = \frac{J_n \omega_n^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (1)$$

где v_c – скорость поступательного движения тела (центра масс); m – масса тела; r – радиус вращательного движения тела; J – момент инерции тела относительно мгновенной оси вращения, проходящей через центр масс; ω – угловая скорость вращения тела; J_n – момент J инерции тела, обусловленный описанием линейного перемещения вращательным; ω_n – угловая скорость ω вращения тела, обусловленная описанием линейного перемещения вращательным.

Из формулы (1) видно, что линейная характеристика движения не в полной мере характеризует кинетическую энергию вращательного движения вала. Поэтому сложное движение тела предпочтительней описывать множеством его вращательных перемещений.

Вал в подшипниковых опорах имеет три оси: геометрическую, инерциальную и ось вращения. В идеальном случае все три оси должны

Выводы

На основании результатов измерений, полученных с помощью разработанных методов гистерезисной интерференции, получены расчетные зависимости $U(x)$ электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель, от расстояния до оси проекции линейного индуктора на магнитный носитель. На магнитный носитель с арктангенсной характеристикой воздействовали сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из трех импульсов. Проведен расчет распределения электрического напряжения $U(x)$ после воздействия на МН с пластиной из свинца толщиной $d_0 = 0,45$ мм, под которой находились попеременно пластины из алюминия толщиной 0,05, 0,051, 0,0525 и 0,055 мм, импульсом магнитного поля линейного индуктора. Время нарастания импульса $1,8 \cdot 10^{-5}$ с. Найденные зависимости $U(x)$ позволяют повысить точность контроля толщины металлических объектов за близлежащими металлическими экранами и в слоях металлов, а также дефектов сплошности в них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магнитный метод контроля толщины слабомагнитных двухсторонних покрытий по немагнитному основанию / А. А. Лухвич [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 75–82.
2. Лухвич, А. А. Контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик–ферромагнетик) основаниях магнитодинамическим методом толщинометрии / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 3–12.
3. Грузинцев, А. А. Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. I. 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. Козлов, В. С. Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.
5. Павагин, В. А. Идентификация кольцевых сварных швов на магнитограммах дефектоскопов поперечного намагничивания / В. А. Павагин, А. Ф. Матвиенко // Дефектоскопия. – 2009. – № 8. – С. 13–18.
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. Суханов, Д. Я. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 56–62.

Разработанный метод позволяет определять толщину алюминиевой пластины, находящейся под пластиной из свинца.

На рис. 3 показаны разностные зависимости 1, 2 и 3 величины $U(x)$ для разных толщин алюминиевых пластин, которые находятся под пластинами из свинца. Зависимость 1 соответствует разности распределения для образца толщиной 0,05 мм и распределения для образца толщиной 0,051 мм; зависимость 2 – для образцов толщиной 0,05 и 0,0525 мм; зависимость 3 – для образцов толщиной 0,05 и 0,055 мм. При этом находили зависимости величины максимальной напряженности магнитного поля для пластин указанных толщин исходя из полученных ранее экспериментальных результатов [10]. Так, при времени нарастания импульса порядка $1,8 \cdot 10^{-5}$ с увеличению толщины пластины на 10, 5 и 2,5 % соответствует увеличение напряженности суммарного магнитного поля вблизи поверхности алюминиевой пластины в 1,015, 1,0075, 1,00375 раза. Информация о толщине пластины может быть получена не только с помощью разностных зависимостей, но и путем анализа прямых и обратных зависимостей $U(x)$ без их вычитания друг из друга. Так, на рис. 4 показаны оптические изображения, построенные с использованием прямых зависимостей $U(x)$.

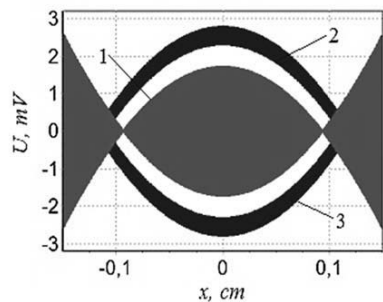


Рис. 4. Оптические изображения магнитных полей, соответствующие распределениям

магнитного поля, с 3,2 до 4,4 мВ, то есть в 1,375 раза. Увеличению толщины алюминиевой пластины на 10 % – увеличение электрического напряжения в 1,75 раза. Путем проведения операций вычисления по точкам зависимости относительное увеличение может быть достигнуто в 5 и более раз. Погрешности при экспериментальных измерениях определяются величинами приборных погрешностей.

В расчетах зависимостей, представленных на рис. 4, приняты следующие коэффициенты А: 1 – $A_{11} = 720 \text{ А} \cdot \text{см}$, $A_{12} = -202 \text{ А} \cdot \text{см}$, $A_{13} = 37 \text{ А} \cdot \text{см}$; 2 – $A_{31} = 725,4 \text{ А} \cdot \text{см}$, $A_{32} = -203,515 \text{ А} \cdot \text{см}$, $A_{33} = 37,2775 \text{ А} \cdot \text{см}$; 3 – $A_{41} = 730,8 \text{ А} \cdot \text{см}$, $A_{42} = -205,03 \text{ А} \cdot \text{см}$, $A_{43} = 37,555 \text{ А} \cdot \text{см}$. Из рис. 4 найдем амплитуды сигналов. Зависимость 1 – 3,2 мВ; зависимость 2 – 4,4 мВ; зависимость 3 – 5,6 мВ. Значит, увеличению толщины алюминиевой пластины на 5 % соответствует увеличение электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, с 3,2 до 4,4 мВ, то есть в 1,375 раза. Увеличению толщины алюминиевой пластины на 10 % – увеличение электрического напряжения в 1,75 раза. Путем проведения операций вычисления по точкам зависимости относительное увеличение может быть достигнуто в 5 и более раз. Погрешности при экспериментальных измерениях определяются величинами приборных погрешностей.

совпадать, иначе возникают вибрации, которые характеризуют различные негативные явления (например, расцентровку вала). Положение геометрической оси определяется геометрическими соотношениями конструктивных элементов объекта. Положение оси вращения определяют при построении орбиты вращения вала. Положение инерциальной оси определяют расчетным путем на этапе разработки конструкции изделия. В процессе эксплуатации положение данной оси по объективным причинам изменяется и уже не соответствует расчетным. Поэтому предлагается положение инерциальной оси определять по параметрам выходных сигналов датчиков вибраций. Суть данного предложения сводится к определению параметра, аналогичного мгновенному центру вращения (далее – МЦВ), – приведенного МЦВ (далее – ПМЦВ). Под ПМЦВ будем понимать точку закрепления тела, относительно которой оно поворачивается на некоторый пространственный угол с вершиной в данной точке, неподвижной в рассматриваемом промежутке времени. Наиболее значимым отличием ПМЦВ от МЦВ является то, что положение ПМЦВ может не принадлежать диагностируемому объекту.

Алгоритм определения диагностических параметров

Алгоритм определения диагностических параметров объекта на основе анализа динамики ПМЦВ заключается в следующем.

- 1 Установка на исследуемом объекте двух вибродатчиков, имеющих две (три) чувствительные оси.
 - 2 Предварительная обработка измеренных вибрационных сигналов: усиление, фильтрация, выделение информативных компонентов.
 - 3 Анализ спектра вибросигналов и определение информативных частот (частоты собственных резонансов конструкции, рабочие частоты деталей изделия, а также кратные им частоты).
 - 4 Вычисление ПМЦВ объекта на каждой из информативных частот относительно положения одного из датчиков.
 - 5 Построение траекторий динамики ПМЦВ, которая в общем случае имеет форму эллипса (рис. 1). Отклонение траектории динамики ПМЦВ от эталонной (для исправного изделия) свидетельствует о нарушении работы диагностируемого объекта. Различия между данными траекториями определяют совокупность информативных параметров, которые характеризуют техническое состояние объекта.
 - 6 Расчет диагностических параметров, характеристика которых приведена в табл. 1.
- Расчет основных параметров траекторий ПМЦВ, характеризующих техническое состояние объекта, приведен в [9]. В настоящее время ведется работа по экспериментальному исследованию граничных условий

применения данных параметров в процессе диагностирования машин с вращающимися элементами.

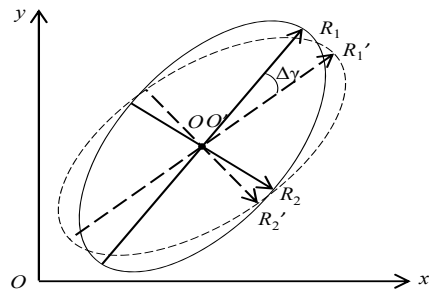


Рис. 1. Траектории динамики координаты ПМЦВ эталонного (сплошная) и диагностируемого (пунктир) объектов

Табл. 1. Параметры траекторий ПМЦВ и их характеристика

Диагностический параметр	Описание
Существенное изменение размеров главных осей эллипса R_1, R_2	На одной опоре характеризует неисправность опорной системы. На обеих опорах примерно в равных долях характеризует радиальную расцентровку вала. Разность углов эллипсов в 180° характеризует наличие угловой расцентровки
Соотношение между главными осями эллипса R_1, R_2	Характеризует неравномерность колебаний вала в опорах подшипника. Увеличение отношения R_1/R_2 характеризует наличие радиальной расцентровки вала. Отношение R_1/R_2 , близкое к единице, характеризует статический дисбаланс. Существенное уменьшение отношения R_1/R_2 характеризует проявление динамического дисбаланса вала
Изменение угла наклона $\Delta\gamma$ большой оси эллипса	Существенное изменение угла $\Delta\gamma$ характеризует наличие прецессии вала за счет его разбалансировки, искривления, угловой либо радиальной несоосности, а также неисправностей опорной системы объекта и подшипникового узла
Разность углов наклона γ эллипсов ПМЦВ в параллельных плоскостях измерений	При существенном изменении размеров эллипса совпадение углов характеризует статический дисбаланс вала. Разность углов в 180° характеризует наличие чисто динамического дисбаланса, а угловая разность в 90° определяет наличие статического и динамического дисбаланса примерно в равных долях. Незначительная угловая разность и существенные изменения параметров эллипса ПМЦВ в одной из плоскостей характеризует неисправность подшипникового узла
Неравномерность угловой скорости перемещения ПМЦВ	Неравномерность угловой скорости ПМЦВ на оборотной частоте вала в одних и тех же точках характеризует скольжение кинетической оси вала в результате неравномерного воздушного зазора, а также качества смазки подшипникового узла

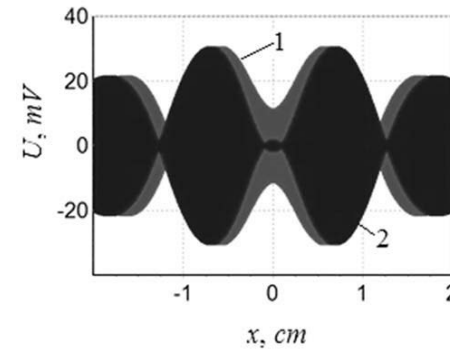


Рис. 2. Оптические изображения магнитных полей, соответствующие распределениям 1 и 2 на рис. 1

информацию о толщине изделий, электрических свойствах материала и параметрах дефектов сплошности в них. Оптические изображения построены путем формирования зеркальных функций полученных распределений $U(x)$, смещения зависимости $U(x)$ по линии ординат, поиска и установления масштабов изображений, а также путем введения соответствия заданным уровням оттенка цветности изображения построенным замкнутым геометрическим фигурам. Так, смещение зависимостей 1 и 2 на рис. 2 равно нулю и нумерация зависимостей 1 и 2 совпадает. Величины коэффициентов A для расчета полей в (1) для данного рисунка не указаны. Значения коэффициентов A для расчета полей при воздействии на МН с

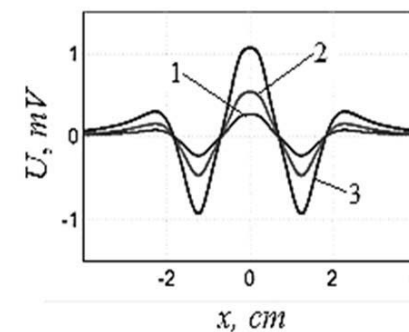


Рис. 3. Расчетные разностные зависимости $U(x)$

с такими же параметрами на МН с пластиной из свинца толщиной $d_0 = 0,45$ мм, под которой вплотную находится пластина из алюминия толщиной $d_0 = 0,05$ мм. В результате получаем зависимость 2 на рис. 1. Для более точного анализа полученных результатов построим оптические изображения $U(x)$ (рис. 2), соответствующие распределениям остаточной намагниченности МН. Оптические изображения $U(x)$ (распределений остаточной намагниченности, распределений остаточных магнитных полей) позволяют оперативно обрабатывать

образцами тремя импульсами магнитного поля указаны при построении графиков на рис. 3 и 4. В программу численных расчетов зависимостей 1, 2 и 3 (рис. 3) внесены следующие значения коэффициентов A в (1). Зависимость 1 – первый импульс $A_{11} = 720$ А·см; второй импульс $A_{12} = -202$ А·см; третий импульс $A_{13} = 37$ А·см. Зависимость 2 – $A_{21} = 722,7$ А·см; $A_{22} = -202,7575$ А·см; $A_{23} = 37,13875$ А·см. Зависимость 3 – $A_{31} = 725,4$ А·см; $A_{32} = -203,515$ А·см; $A_{33} = 37,2775$ А·см. Зависимость 4 – $A_{41} = 730,8$; $A_{42} = -205,03$; $A_{43} = 37,555$.

алгебраические операции с построением фигур гистерезисной интерференции.

Тангенциальную составляющую напряженности импульсного магнитного поля, созданного линейным индуктором, рассчитывали по формуле

$$H = A / (x^2 + b^2), \quad (1)$$

где A – постоянная; x – расстояние в сантиметрах до проекции оси индуктора в плоскости измерения; b – расстояние в сантиметрах от оси индуктора до магнитного носителя.

Величину электрического напряжения, снимаемого с используемого преобразователя магнитного поля при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля в прямом направлении H_1 , рассчитывали по формуле

$$U_1 = B + 24,3 \arctg (0,011H_1 - C), \quad (2)$$

а величину электрического напряжения при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля H_1 в прямом направлении и вторым обратным импульсом H_2 находили как

$$U_2 = -B + 0,61U_1 + (24,5 + 0,40U_1) \arctg ((0,011 + DU_1) H_2 + C - 16U_1), \quad (3)$$

где B, C, D – постоянные. При использовании метода нулевого центрального максимума [12, 14, 15] получали максимальную чувствительность в точке, лежащей на проекции оси индуктора.

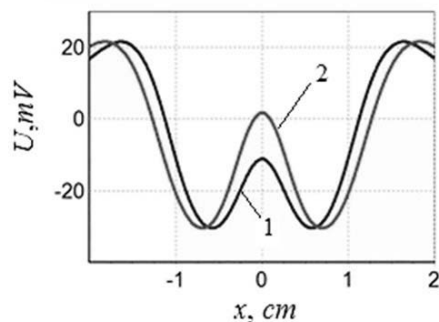


Рис. 1. Расчетные зависимости $U(x)$: 1 – для пластины из свинца; 2 – для пластины из алюминия. Толщина пластины $d = d_0$

Рассчитаем распределение электрического напряжения $U(x)$ преобразователя магнитного поля, сканирующего МН после воздействия на МН с пластиной из свинца толщиной $d_0 = 0,45$ мм тремя импульсами магнитного поля с чередующейся полярностью. Время нарастания импульса $1,8 \cdot 10^{-5}$ с. В результате получаем зависимость 1 (рис. 1) величины $U(x)$ снимаемого с преобразователя магнитного поля от расстояния x до оси проекции индуктора на МН. Далее воздействуем серией из трех импульсов магнитного поля

На основе использования разработанной методики анализа ПМЦВ [9] в Научно-техническом центре комбайностроения ОАО «Гомсельмаш» были проведены вибрационные испытания опор коленчатых валов соломотряса зерноуборочного комбайна. В ходе эксперимента, в частности, были определены величины углов отклонений осей коленчатых валов от параллельности, что позволило предложить ряд рекомендаций по регулировке наиболее нагруженных элементов соломотряса [10]. Получен положительный эффект, который заключается в сокращении времени на доводку элементов клавишного соломотряса. По предварительным расчетам экономия трудозатрат на доводку одного опытного образца зерноуборочного комбайна составляет от 100 до 200 н. ч. в год (в зависимости от модели комбайна).

На ОАО «2566 завод по ремонту радиоэлектронного вооружения» проведены исследования вибраций электромашиного преобразователя ПСЧ-50. В результате исследования динамики ПМЦВ получены новые диагностические признаки, которые позволили определить вид и степень несоосности валов генератора и асинхронного двигателя. Было установлено снижение трудозатрат при проведении выходного контроля и текущего ремонта ПСЧ-50.

Выводы

Таким образом, в данной работе дано обоснование использования ПМЦВ для диагностирования машин с вращающимися элементами. Предложен алгоритм получения диагностических параметров на основе анализа динамики ПМЦВ, который может быть получен по выходным сигналам датчиков вибрации.

Анализ динамики ПМЦВ может выполняться одновременно с другими методами диагностирования объекта (например, методами спектрального анализа вибросигнала). Такая возможность реализуется на основе использования единой измерительной системы датчиков, что позволяет объективно сравнивать результаты двух методов и, соответственно, повысить достоверность диагностирования объекта.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали наличие положительного экономического эффекта: снижение трудозатрат на проведение выходного контроля механизмов с вращающимися элементами. Данный эффект достигается за счет упрощения анализа вибрационного состояния объекта, наглядности и простоты интерпретации траекторий ПМЦВ.

Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на разработку частных методик технического диагностирования объектов и методик контроля их технического состояния в процессе эксплуатации и ремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев, [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. **Барков, А. В.** Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учебное пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
3. **Калинов, А. П.** Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / А. П. Калинов, О. В. Браташ // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2012. – № 5. – С. 44–52.
4. **Денисюк, Ю. Ю.** Вибродиагностирование электрических машин в условиях помех и неопределенностей / Ю. Ю. Денисюк // Вестн. Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 3 (46). – С. 57–65.
5. Crank Identification of the Rotary Kiln Based on WTD-EEMD Using Vibration Monitoring of the Supporting Rollers / K. Zheng [et al.] // Engineering Letters. – 2016. – Vol. 24, iss. 4. – P. 429–440.
6. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования: ГОСТ ИСО 7919-1–2002. – перев. Междунар. стандарта ISO 7919-1–1996; введ. РФ 01.11.07. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 20 с.
7. **Яблонский, А. А.** Курс теоретической механики: учебник для вузов / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – Москва: Интеграл-пресс, 2006. – 608 с.
8. **Никитин, Н. Н.** Курс теоретической механики: учебник для машиностроит. и приборостроит. специальностей вузов / Н. Н. Никитин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1990. – 607 с.
9. **Осадчий, И. А.** Методика вибрационного контроля вращающихся механизмов по динамике их мгновенного центра вращения / И. А. Осадчий // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 35. – С. 116–125.
10. Методика диагностики соломотряса зерноуборочного комбайна в процессе его доводки / И. А. Осадчий [и др.] // Агропанорама, БГАТУ. – 2018. – № 3. – С. 5–9.

Е-mail авторов: igor-2105@yandex.ru.

контроля сварных швов в изделиях из ферромагнитных материалов применяют магнитографический метод [3–5]. Визуализацию полей дефектов ферромагнитных объектов осуществляют с помощью пленки Flux-detector [6]. Контроль дефектов в металлах можно проводить с помощью магнитоиндукционного интроскопа [7]. Для этих целей наиболее часто используют вихретоковый метод. Так, вихретоковым методом можно вести диагностику пластины с трещиной [8]. Следует отметить также работы Ф. Ферстера по вихретоковой дефектоскопии, например, [9].

Определению толщины и других геометрических размеров металлических объектов, электрических и магнитных свойств материалов объектов, а также определению параметров дефектов сплошности в них посвящены [10–15]. Здесь использована полученная авторами гистерезисная интерференция импульсного магнитного поля, а также разработанные на ее основе методы контроля. В этих работах также представлены экспериментальные результаты определения параметров объектов, находящихся за металлическими экранами.

Целью настоящей работы является повышение точности контроля определения толщины электропроводящих объектов, находящихся за металлическими экранами или слоями металлов, их разнотолщинности и дефектов сплошности в них.

Поставленная цель достигается путем проведения теоретических расчетов распределений электрического напряжения $U(x)$ от координаты x , снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель (МН). Распределения остаточных магнитных полей МН соответствуют распределениям остаточной намагниченности участков магнитного носителя.

Записи магнитных полей получали путем воздействия на объект с МН сериями из нескольких разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора. Для расчетов использовали формулы, полученные ранее в [14, 15] для МН с арктангенсными характеристиками ветвей гистерезиса.

При проведении теоретических расчетов прохождение импульсов магнитного поля моделировали следующим образом. Исходя из экспериментальных зависимостей величины вторичного магнитного поля вблизи поверхности металлического объекта от его толщины [10] и характеристик магнитного носителя [14, 15] определяли амплитуды и время нарастания импульсов поля, воздействующих на МН с объектом. После этого создавали программу компьютерных расчетов с найденными зависимостями, с помощью которой рассчитывали величину электрического напряжения U на выходе преобразователя магнитного поля, сканирующего МН, с выводом электрического сигнала на цифровой осциллограф и на монитор. С полученными распределениями проводили

УДК 620.130

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 620.130

NUMERICAL CALCULATIONS OF THE ELECTRIC SIGNAL DISTRIBUTIONS OF THE MAGNETIC FIELD CONVERTER IN HYSTERESIS INTERFERENCE

V. V. PAVLYUCHENKO, E. S. DOROSHEVICH

Аннотация. На основании результатов экспериментальных измерений, полученных с помощью разработанных методов гистерезисной интерференции, проведены теоретические расчеты распределений электрического напряжения $U(x)$, снимаемого с преобразователя магнитного поля, от пространственной координаты x . Получены зависимости $U(x)$ для пластин из алюминия толщиной 0,05, 0,051, 0,0525 и 0,055 мм, находящихся за близлежащей пластиной свинца толщиной $d_0 = 0,45$ мм. Запись импульсных магнитных полей линейного индуктора осуществляли на магнитный носитель с арктангенсной характеристикой. Найденные зависимости $U(x)$ позволяют повысить точность контроля толщины металлических объектов за близлежащими металлическими экранами и в слоях металлов, а также дефектов сплошности в них.

Ключевые слова: гистерезисная интерференция, импульсное магнитное поле, арктангенсная характеристика магнитного носителя, вторичное магнитное поле.

Abstract. Based on the developed methods of hysteresis interference and the obtained results of experimental measurements, theoretical calculations of the distributions of the electric voltage $U(x)$, taken from the magnetic field transducer from the spatial coordinate x , were carried out. The dependences $U(x)$ were obtained for aluminum plates with a thickness of 0,05, 0,051, 0,0525 and 0,055 mm, located behind a nearby lead plate with a thickness of $d_0 = 0,45$ mm. The recording of pulsed magnetic fields of a linear inductor was carried out on a magnetic carrier with an arctangent characteristic. The recording of pulsed magnetic fields of a linear inductor was carried out on a magnetic carrier with an arctangent characteristic. The found dependences $U(x)$ make it possible to increase the accuracy of monitoring the thickness of metal objects behind nearby metal screens and in metal layers, as well as continuity defects in them.

Key words: hysteresis interference, pulsed magnetic field, arctangent characteristic of a magnetic carrier, secondary magnetic field.

Толщину металлических объектов и параметры дефектов сплошности в них можно находить разными методами. Так, контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик–ферромагнетик) основаниях контролируют магнитодинамическим методом [1, 2]. Для

УДК 620.130

КОМПЬЮТЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ

Белорусский национальный технический университет

UDC 620.130

COMPUTER CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELDS USING HYSTERESIS PROPERTIES OF A MAGNETIC CARRIER **V. V. PAVLYUCHENKO, E. S. DOROSHEVICH**

Аннотация. На основании результатов экспериментальных исследований предложен алгоритм построения изображений магнитных полей глубинных дефектов. Представлены изображения магнитных полей внутри объекта в виде пластины совместно с изображением объекта в сечении. Полученные результаты позволяют повысить точность контроля глубины залегания дефектов в металлах.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, дефекты сплошности в металлах, изображения полей дефектов.

Abstract. Based on the obtained experimental studies, a theoretical model for obtaining images of magnetic fields of deep-seated defects has been created. The images of magnetic fields inside the object in the form of a plate are presented together with the image of the object in section. The results obtained make it possible to increase the accuracy of monitoring the parameters of defects in ferromagnetic, paramagnetic, diamagnetic metals due to the developed scheme for constructing optical images and extracting information about the magnetic fields of defects.

Key words: pulsed magnetic field, continuity defects in metals, images of defect fields.

Дефекты сплошности в металлических объектах, а также электрические и магнитные свойства материалов объектов можно контролировать разными магнитными и электромагнитными методами. Наибольшее количество экспериментальных и теоретических работ выполнено с использованием вихретокового метода. В одной из этих работ [1] исследованы поля поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины, в других [2, 3] изложен метод магнитоиндукционной томографии, а поле электропроводящего объекта представлено в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов. Большое внимание выявлению дефектов сплошности уделено при разработке методов магнитографической дефектоскопии. Так, в [4, 5] исследована запись полей дефектов при тангенциальном намагничивании объекта и осуществлено экспериментальное определение глубины залегания дефектов. Метод контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами [6, 7] может быть применен как для определения толщины слоев, так и для контроля дефектов

в объектах. При проведении расчетов намагничивания объектов из ферромагнитных металлов в ряде случаев учитывается аналитическая модель точечного намагничивания, описанная в [8]. Вопросам магнитной и электромагнитной дефектоскопии посвящен ряд работ [9–16], где развит предложенный авторами метод гистерезисной интерференции, позволяющий в 5 и более раз повысить точность определения параметров дефектов и толщины металлических объектов, и представлены впервые полученные квазилинейные зависимости величины максимальной тангенциальной составляющей вторичного поля вблизи поверхности металлов от толщины объектов. Эти зависимости используются в экспериментальных измерениях и при проведении теоретических расчетов для определения удельной электропроводности, магнитной проницаемости, толщины объектов, параметров дефектов сплошности в них, их геометрических размеров и так далее.

Устройства и способы контроля металлических объектов подробно изложены в [9, 10, 14], где развиты магнитографический и магнитооптический способы контроля, а также описаны разработанные способы определения толщины металлических объектов и дефектов в них с помощью преобразователей Холла. При этом на магнитный носитель или другие преобразователи, приложенные к контролируемому объекту, воздействовали серией одиночных импульсов в количестве 1, 2, 3, 5 и более импульсов. На объект с преобразователем воздействовали также импульсами сложной формы для определения дефектности объектов с выводом преобразователя на участки с максимальной чувствительностью. Экспериментальные работы проведены с преобразователями Холла, магнитооптической пленкой с гигантским фарадеевским вращением и магнитными носителями (МН) с разными калибровочными характеристиками. Диапазон измеряемых полей составлял 1...5000 А/см. Толщина контролируемых ферромагнитных объектов (например, Ст 3) достигала 2 см. Контроль диа- и парамагнитных объектов осуществляли в диапазоне толщин от 0,01 мм до 1 см. Измерения напряженности магнитных полей проводили с помощью цифровых осциллографов с выводом информации на монитор. При этом основное внимание уделено экспериментальным измерениям. Поэтому для повышения точности измерения требуются теоретические расчеты распространения импульсных магнитных полей в указанных объектах, в частности, расчеты полей дефектов на поверхности контролируемых изделий.

Целью работы является повышение точности определения параметров дефектов сплошности в металлических объектах путем проведения расчетов полей локальных источников магнитного поля, расчетов магнитных полей дефектов на поверхности объектов и визуализации магнитных полей этих дефектов внутри объекта совместно с изображением объекта в сечении.

7. Контроль магнитодинамическим методом толщины никелевых покрытий подхромовыми на двухслойных (неферромагнетик – ферромагнетик) основаниях / А. А. Лухвич [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 1. – С. 3–10.

8. **Печенков, А. Н.** Аналитическая модель точечного намагничивания тонкой ферромагнитной пластины / А. Н. Печенков, В. Е. Щербинин, Я. Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 19–26.

9. **Павлюченко, В. В.** Одним импульсом / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // LAP LAMBERT Academic Publishing: Saarbrücken, 2013. – 174 с.

10. **Павлюченко, В. В.** Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.

11. **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.

12. **Павлюченко, В. В.** Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич, В. Л. Пивоваров // Дефектоскопия. – 2016. – № 3. – С. 48–56.

13. **Pavlyuchenko, V. V.** Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, № 2. – P. 121–127.

14. **Павлюченко, В. В.** Обнаружение протяженных дефектов сложной формы в токопроводящих пластинах с помощью магнитного носителя / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 31–38.

15. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 12. – С. 56–63.

16. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция магнитного поля перемещаемого линейного индуктора / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 51–60.

распределения напряженности магнитного поля глубинного дефекта на поверхности объекта, перенесенные вглубь изображения объекта в его сечении с учетом порогового уровня записи H_0 магнитного носителя. Регулирование этого уровня при записи магнитных полей дефектов на магнитный носитель предложено осуществлять путем использования гистерезисных свойств магнитного носителя. Показано также «оптическое изображение» магнитного поля дефекта совместно с изображением объекта в сечении с графиком зеркальной функции, позволяющей локализовать это поле.

Полученные результаты позволяют повысить точность контроля глубины залегания дефекта за счет точного размещения оптического изображения магнитного поля дефекта на локальном участке изображения контролируемого объекта в плоскости его поперечного сечения, где расположен реальный дефект. При этом осуществлена локализация размеров изображения и его размеры приближены к размерам дефекта в сечении контролируемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ферстер, Ф.** Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины / Ф. Ферстер. – Дефектоскопия. – 1984. – № 12. – С. 13–18.
2. **Суханов, Д. Я.** Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Изв. высших учебных заведений. – 2015. – Т. 58, № 10/3. – С. 73–75.
3. **Суханов, Д. Я.** Представление поля электропроводящего объекта в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов и их томография / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Изв. высших учебных заведений. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 28–34.
4. **Новиков, В. А.** Запись поля дефекта на магнитную ленту при тангенциальном намагничивании полями последовательно противоположных направлений / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 54–60.
5. **Новиков, В. А.** Экспериментальное определение глубины залегания и величины цилиндрического дефекта в ферромагнитной пластине с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 25–30.
6. **Лухвич, А. А.** Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.

Будем использовать следующую модель теоретических расчетов. Сначала определим источник магнитного поля, эквивалентный глубинному дефекту и, исходя из [9], определим параметры воздействующих на объект с магнитным носителем импульсных магнитных полей. Распределение магнитного поля дефекта внутри объекта рассматривать пока не будем. Пусть на поверхности объекта пространственное распределение поля глубинного дефекта (например, поперечной полости) соответствует распределению поля линейного индуктора, расположенного на глубине d_0 от поверхности, ось которого параллельна поверхности объекта. Тогда зависимость тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вблизи поверхности объекта следует определять по формуле [9]

$$H = A / (x^2 + b^2), \quad (1)$$

где A – постоянная; x – расстояние в сантиметрах до проекции оси индуктора в плоскости измерения; b – расстояние от оси индуктора до магнитного носителя, см.

Параметры импульсов магнитного поля (амплитуды и время нарастания) находим из данных измерений [10] и свойств магнитного носителя [15].

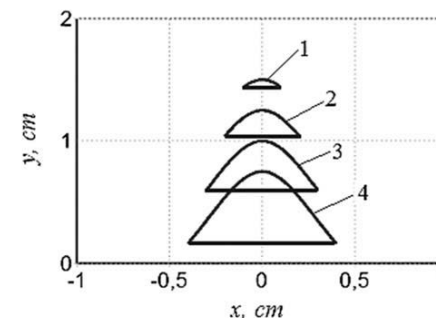


Рис. 1. Изображение распределений 1–4 напряженности магнитного поля глубинного дефекта на поверхности объекта, которое перенесено вглубь объекта

При моделировании использована пластина толщиной 2 см ($y_1 = 0$, $y_2 = 2$ см) в сечении (рис. 1–3). Пластина содержит дефект в виде поперечной протяженной (более 1 см) полости диаметром около 0,4 см, ось которой расположена на глубине 0,5 см от верхней поверхности металлической пластины. Воздействие на пластину импульсом магнитного поля осуществляется с верхней стороны пластины $y_2 = 2$ см. Воздействуем на пластину импульсами

магнитного поля с увеличивающимся временем нарастания и получим распределения $H(x)$ напряженности магнитного поля на поверхности пластины. Эти распределения включают в себя распределения напряженности воздействующего магнитного поля, поля глубинного дефекта и поля индукционных токов. В случае пара- и диамагнитных металлов величина максимальной тангенциальной составляющей магнитного поля растет с уменьшением времени нарастания импульса [10] в определенных

диапазонах толщины объекта. Если объект изготовлен из ферромагнитного материала, то с уменьшением времени нарастания импульса динамическая магнитная проницаемость материала уменьшается и величина суммарной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности объекта увеличивается.

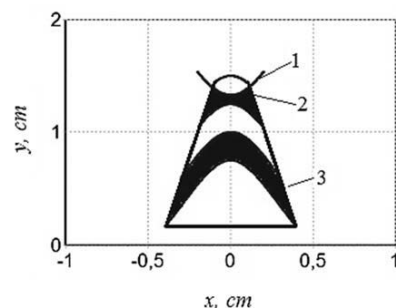


Рис. 2. Оптические изображения 2 и 3 магнитных полей глубинного дефекта в сечении объекта с графиком зеркальной функции 1

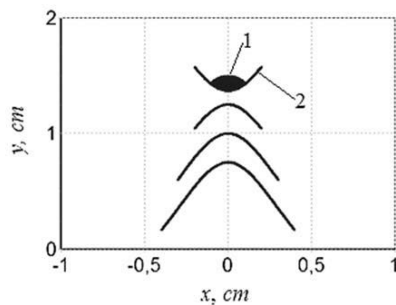


Рис. 3. Локальное оптическое изображение 1 магнитного поля глубинного дефекта в сечении объекта с графиком зеркальной функции 2 и распределениями магнитного поля

Преобразуем зависимости $H(x)$ в распределения $y(x)$, представляющие собой изображения магнитных полей, выраженные в координатах x и y в сантиметрах внутри изображенной на рис. 1 пластины и соответствующие распределениям напряженности магнитного поля на поверхности объекта. Преобразование зависимостей $H(x)$ в распределения $y(x)$ осуществляем следующим образом. Устанавливаем уровень H_0 , начиная с которого на используемый МН можно производить запись магнитных полей (порог чувствительности МН). Например, у одного из таких МН величина $H_0 = 30$ А/см. Проводим горизонтальную линию $H_0 = 30$ А/см, находим координаты x пересечения этой линии с зависимостями $H(x)$ и определяем длину отрезков линий, соединяющих найденные точки каждой зависимости. На основании найденных предварительно зависимостей $H(x)$, соответствующих глубине залегания определенного внутреннего дефекта в объекте из металла (например, алюминия), определяем положение каждой горизонтальной линии на изображении объекта в сечении. Так, на рис. 1 показано расположение отрезков линий, ограничивающих дуги 1–4. После этого соединяем между собой концы разных отрезков, вследствие чего образуются замкнутые геометрические фигуры. В результате получаем изображения магнитных полей дефекта на разной глубине (см. рис. 1), т. е. строчные изображения поля на поверхности переведены в растровые по толщине пластины с формированием оптических изображений магнитных

полей. При этом проведены алгебраические преобразования с полученными распределениями таким образом, что полю импульса с наименьшим временем возрастания введена соответствующая глубина залегания дефекта. Эти соответствия положения зависимостей 1–4 были определены с помощью подхода, предложенного в [9].

Регулировать пороговые уровни записи H_0 магнитных полей дефектов на магнитный носитель можно путем использования его гистерезисных свойств. Для этого, анализируя гистерезисные ветви магнитного носителя, предварительно намагничиваем его в обратном направлении, после чего воздействуем на МН с объектом импульсом магнитного поля в прямом направлении.

Начиная с некоторого импульса поле дефекта, расположенного на глубине 0,5 см ($y_3 = 1,5$ см (см. рис. 2)), начнет достигать поверхности объекта. На рис. 2 показана зеркальная (по отношению к функции 1 (см. рис. 1)) функция 1, а также полученные оптические изображения магнитных полей 2 и 3.

Дефект является локальным нарушением, а изображение его поля (фигура, образованная огибающей на рис. 2) простирается к нижней поверхности пластины. Значит, изображение поля дефекта следует локализовать, что и сделано на рис. 2 путем построения зеркальной функции 1 и выделения поля дефекта. Локальное оптическое изображение поля дефекта 1, соответствующее его глубине залегания, показано на рис. 3. Оно получено путем отсечения части изображения линией 2 из полного изображения замкнутой фигуры, показанного на рис. 2. Выделение оптического изображения поля дефекта и его локализация на изображении объекта в сечении осуществляются сравнением с предварительно полученными изображениями магнитных полей разных дефектов. Следующим этапом является построение изображения самого дефекта, например, полости в сечении. Отметим, что толщине пластины около 2 см из ферромагнитного материала соответствует время нарастания импульсов в интервале 0,01...0,5 с и более, а для пара- и диамагнитных металлов толщиной до 4 мм – $(1...200) \cdot 10^{-6}$ с.

Полученные результаты позволяют повысить точность контроля глубины залегания дефекта за счет точного размещения оптического изображения магнитного поля дефекта на локальном участке изображения пластины в плоскости ее поперечного сечения, где расположен реальный дефект.

Выводы

На основании полученных экспериментальных исследований предложен алгоритм визуализации магнитных полей глубинных дефектов на поверхности объектов из электропроводящих материалов. Представлены