

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

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Сборник статей 8-й Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 29–30 сентября 2022 года)

Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2022

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. *В. А. Новиков* (зам. гл. редактора); канд. техн. наук, доц. *А. А. Афанасьев*; д-р техн. наук, проф. *А. Р. Баев*; канд. техн. наук, доц. *С. В. Болотов*; д-р техн. наук, проф. *В. П. Лунин*; канд. техн. наук, доц. *С. С. Сергеев*; д-р физ.-мат. наук, доц. *А. В. Хомченко*; *И. В. Брискина* (отв. секретарь)

С56 **Современные** методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т, Ин-т прикладной физики НАН Беларуси, Белорус. ассоц. неразрушающего контроля и техн. диагностики, Рос. общество по неразрушающему контролю и техн. диагностике; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – 306 с.: ил.
ISBN 978-985-492-280-5.

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 978-985-492-280-5

© Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

АББАКУМОВ К. Е., ВАГИН А. В., СИДОРЕНКО И. Г. Акустические характеристики графитовых включений в листах из медного сплава, полученного по технологии двойного вакуумного переплава.....	11
АТРОЩЕНКО В. В., АДЖИБАЕ Д. А., САВИЧЕВ М. П. Разработка методики ультразвукового контроля равнотолщинных стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом.....	16
БАЕВ А. Р., АСАДЧАЯ М. В., СЕРГЕЕВА О. С., ПАРАДИНЕЦ В. В. Об использовании краевых волн для контроля объектов с технологическим выступом или пазом.....	21
БАЕВ А. Р., МАЙОРОВ А. Л., БУРНОС А. Ю., РАЗМЫСЛОВИЧ Г. И., АСАДЧАЯ М. В. Импульсно-лазерное возбуждение упругих волн в светопоглощающей среде.....	27
БАЗРОВ Б. М., РОДИОНОВА Н. А., ХЕЙФЕЦ М. Л., СОЛОМАХО В. Л., ГУРЕВИЧ В. Л. Основы теории базирования и закрепление предметов с учетом новых технологий.....	32
БАЗУЛИН А. Е., ТИХОНОВ Д. С. Опыт применения автоматизированного ультразвукового контроля опасных производственных объектов.....	37
БОЛОТОВ С. В., ЗАХАРЧЕНКОВ К. В., БОБКОВ Н. К. Технология дистанционного контроля и регистрации сварочных процессов.....	42
БРАНЦЕВИЧ П. Ю. Проектирование сети принятия решений для систем вибрационной диагностики и автоматики защиты.....	49
БУЛАТОВ О. В., ШАРАНДО В. И. Влияние формы измерительного наконечника на точность измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий.....	57
БУРАК В. А. Влияние величины размагничивающего поля на магнитную анизотропию листового проката сталей.....	63
БЫЗОВ А. В., КСЕНОФОНТОВ Д. Г., КОСТИН В. Н., ВАСИЛЕНКО О. Н. Теоретические основы и реализация метода селективной оценки качества поверхностного упрочнения.....	67
ВОРОБЕЙ Р. И., ГУСЕВ О. К., СВИСТУН А. И., ТЯВЛОВСКИЙ А. К., ТЯВЛОВСКИЙ К. Л., ШАДУРСКАЯ Л. И. Магниторекомбинационный преобразователь с оптическим управлением.....	74
ГОРДЕЕВА А. С., СЕРГЕЕВ С. С. Исследование эффективности возбуждения волн Рэлея различными преобразователями.....	79
ГОРДЕЕВА А. С., СЕРГЕЕВ С. С. Исследование эффективности сменных протекторов для наклонных ультразвуковых пьезопреобразователей.....	84

ИВАНОВ В. В., ГОГОЛИНСКИЙ В. Ф., АФАНАСЬЕВ А. А. Пневмооптоэлектронное устройство бесконтактного технологического контроля диаметра вала электродвигателя.....	94
КОВШОВ Е. Е., КУВШИННИКОВ В. С. Применение современных компьютерных технологий при подготовке специалистов по радиографическому методу неразрушающего контроля.....	99
КОРОЛЕВ А. С., ШАРАПОВ Е. С., ШЛЫЧКОВ С. В. Оценка влияния метода измерения сопротивления сверлению на некоторые прочностные характеристики древесины сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.).....	105
КОСТИН В. Н., ПЕРОВ В. Н., СЕРБИН Е. Д., ВАСИЛЕНКО О. Н. Дифференциальная магнитная проницаемость как индикатор рекристаллизации никеля.....	112
КРЕНЬ А. П., МАЦУЛЕВИЧ О. В., ГОРИЧЕНКО С. Ф., ДЕЛЕНДИК М. Н. Оценка вязкоупругих характеристик битумно-мастичной изоляции газопроводов.....	116
КУТЕПОВ А. Ю., КРЕНЬ А. П. Сравнение результатов измерений остаточных напряжений прибором НТ-800 с показаниями рентгеновского дифрактометра.....	121
КУХАРЕНКО И. М., САВИЦКИЙ И. С., ПРИМАК И. У., ХОМЧЕНКО А. В. Поляризационные измерения механических напряжений в тонкостенных стеклянных контейнерах.....	125
КУШНЕР А. В., ШИЛОВ А. В., НОВИКОВ В. А. Обнаружение дефектов в стыковых сварных соединениях косвенным методом.....	129
ЛЕНЕВСКИЙ Г. С., ШНИП Д. В. Контроль основных характеристик технологических процессов молочных такси на молочно-товарных фермах.....	134
ЛУНИН В. П. Роль математического моделирования в решении актуальных задач неразрушающего контроля.....	139
ЛУНИН В. П., ДОБРОКЛОНСКАЯ М. С. Оценка вероятности обнаружения дефекта типа трещина в парогенераторных трубах.....	149
ЛУНИН В. П., КОМЯГИН М. А. Проектирование преобразователя для импульсного вихретокового контроля многослойных изделий.....	155
МАРЧЕНКОВ А. Ю., КРЕНЬ А. П., БАРАТ В. А. Влияние структуры и остаточных напряжений на результаты акустико-эмиссионной диагностики железнодорожных рельсов.....	162
ОТОНА А. Г., ХОЛОДИЛОВ О. В. Применение различных материалов в качестве протектора для вихретоковых преобразователей.....	168
ПАВЛЮЧЕНКО В. В., ДОРОШЕВИЧ Е. С. Контроль объектов сложной формы в магнитном поле.....	177
ПОВОЛОЦКАЯ А. М., МУШНИКОВ А. Н. Эволюция магнитных параметров образцов из корпусной стали 20ГН с различным исходным напряженно-деформированным состоянием при упругом растяжении.....	182

ПОЗДНЯКОВ В. Ф., ПОЗДНЯКОВА Е. В. Оценка погрешности оптического тракта вторичного преобразователя лазерного интерферометра.....	188
ПОТРАХОВ Н. Н., ГУК К. К., БЕССОНОВ В. Б. Передвижные рентгеновские установки для контроля материалов и промышленных изделий.....	193
ПРОТАСЕНЯ Т. А., КРЕНЬ А. П., ЛАНЦМАН Г. А., ДЬЯКОВА Г. Н. Оценка влияния параметров 3D-печати полимерных изделий и режимов их постобработки на физико-механические характеристики продукции аддитивного синтеза.....	199
ПРУДНИКОВ А. Н. Риск-ориентированный подход при оценке технического состояния магистральных трубопроводов.....	205
ПУДОВ В. И., ДРАГОШАНСКИЙ Ю. Н. Исследования объемной структуры магнитомягких материалов оптическим методом.....	212
РАЗОВ И. О. Исследование частот свободных колебаний наземных и подземных тонкостенных трубопроводов большого диаметра с позиции теории цилиндрических оболочек.....	217
РИГМАНТ М. Б., КОЧНЕВ А. В., КАЗАНЦЕВА Н. В., КОРХ Ю. В., КОРХ М. К. Выявление магнитной анизотропии в аустенитной стали 09Х17Н5Ю после деформации прокаткой.....	224
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Использование корреляций между физико-механическими свойствами сталей в магнитном структурном анализе.....	230
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Расчет намагничивания сталей по параметрам предельной петли гистерезиса: кривая Столетова.....	236
СЕМЕНОВ А. В. Вихретоковый преобразователь для контроля канатов из параллельных прядей.....	243
СОТНИК М. М., АФАНАСЬЕВ А. А. Разработка и исследование функции преобразования турбидиметра с адаптивными параметрами.....	250
СОТСКАЯ Л. И., ЧУДАКОВ Е. А., СОТСКИЙ А. Б., КРИВЕЦКИЙ К. Н., СТАСЬКОВ Н. И. Спектрофотометрия интерференционного покрытия в ходе его изготовления.....	256
СТАСЬКОВ Н. И., ПАРАШКОВ С. О., ЧУДАКОВ Е. А. Влияние температуры отжига на оптические характеристики тонких пленок сульфида индия.....	262
ТЕРЕХИН И. В., СЛАВИНСКАЯ Е. А. Практическая реализация импульсного вихретокового датчика для контроля уровня металла в сортовых кристаллизаторах.....	268
ТРЕТЬЯКОВА В. А., АФАНАСЬЕВ А. А., ГОГОЛИНСКИЙ В. Ф. Разработка и исследование вторичного измерительного преобразователя для пневмодатчика размерного контроля.....	274

ТЯВЛОВСКИЙ А. К., ЖАРИН А. Л., СВИСТУН А. В., САМАРИНА А. В., ПАНТЕЛЕЕВ К. В., МИКИТЕВИЧ В. А. Малогабаритный сканирующий электрометрический зонд для контроля дефектов поверхности полупроводниковых и наноструктурированных материалов	280
ХОМЧЕНКО А. В., ПРИМАК И. У. Рефлектометрические методы диагностики тонкопленочных структур.....	286
ЧЕРНЫШЕВ А. В., ШАРАНДО В. И., КРЕМЕНЬКОВА Н. В., ПИУНОВ В. Д. Вихретоковая толщинометрия диэлектрических покрытий на деформированной стали 12Х18Н10Т.....	290
ЧИЖИК С. А., ХЕЙФЕЦ М. Л., ВИНТОВ Д. А., ЭМ В. Т., КАРПОВ И. В. Наноиндентирование и определение дифракцией нейтронов деформированного состояния материала.....	295
ШАРАНДО В. И., ЧЕРНЫШЕВ А. В., КРЕМЕНЬКОВА Н. В., ПИУНОВ В. Д. Магнитодинамическая толщинометрия немагнитных покрытий на деформированной стали 12Х18Н10Т.....	301

CONTENTS

ABBAKUMOV K. E., VAGIN A. V., SIDORENKO I. G. Acoustic characteristics of graphite inclusions in copper alloy sheets obtained by double vacuum remelting technology.....	11
ATROSHENKO V. V., AJIBAYE D. A., SAVICHEV M. P. Development of the technique for ultrasonic inspection of butt welded joints using the time of flight diffraction method.....	16
BAEV A. R., ASADCHAYA M. V., SERGEEVA O. S., PARADINETS V. V. On the use of edge waves to test objects with a technological ledge or groove.....	21
BAEV A. R., MAYOROV A. L., BURNOS A. Y., RAZMYSLOVITCH G. I., ASADCHAYA M. V. Pulse-laser excitation of elastic waves in light-absorbing medium.....	27
BAZROV B. M., RODIONOVA N. A., KHEIFETZ M. L., SOLOMAKHO V. L., GUREVICH V. L. Foundations of the theory of based and fixing of subjects taking into account of new technologies	32
BASULIN A. E., TIKHONOV D. S. Experience of application of automated ultrasonic inspection of hazardous production facilities.....	37
BOLOTOV S. V., ZAKHARCHENKOV K. V., BOBKOV N. K. Technology of remote control and registration of welding processes.....	42
BRANCEVICH P. J. Decision network for systems vibration diagnosis and protection automation.....	49
BULATOV O. V., SHARANDO V. I. Influence of the measuring tip shape on the precision of thickness measurement of the imitators of non-ferromagnetic coatings.....	57
BURAK V. A. Demagnizing field value influence on the magnetic anisotropy of rolled steel sheet.....	63
BYZOV A. V., KSENOFONTOV D. G., KOSTIN V. N., VASILENKO O. N. Theoretical foundations and implementation of the method of selective evaluation of surface hardening quality.....	67
VOROBAY R. I., GUSEV O. K., SVISTUN A. I., TYAVLOVSKY A. K., TYAVLOVSKY K. L. Optical driven magneticorecombinational converter.....	74
GORDEEVA A. S., SERGEEV S. S. Study of the efficiency of excitation of Rayleigh waves by different converters.....	79
GORDEEVA A. S., SERGEEV S. S. Investigation of the effectiveness of replaceable protectors for inclined ultrasonic piezoelectric transducers.....	84
IVANOV V. V., GOGOLINSKY V. F., AFANASIEV A. A. Pneumo-optoelectronic device for non-contact technological control of electric motor shaft diameter.....	94

KOVSHOV E. E., KUVSHINNIKOV V. S. Application of modern computer technologies in training of radiographic method of non-destructive testing specialists.....	99
KOROLEV A. S., SHARAPOV E. S., SHLICHKOV S. V. Effect of drilling resistens measurements on some residual strength properties of scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.).....	105
KOSTIN V. N., PEROV V. N., SERBIN E. D., VASILENKO O. N. Differential permeability as nickel recrystallization indicator.....	112
KREN A. P., MARSULEVICH O. V., GORICHENKO S. F., DELENDIK M. N. Evaluation of viscoelastic characteristics of bitumen-mastic insulation of gas pipelines.....	116
KUTEPOV A. YU., KREN A. P. Comparison of residual stresses measurement using NT-800 device with x-ray diffractometer readings.....	121
KUHARENKO I. M., SAVITSKY I. S., PRIMAK I. U., KHOMCHENKO A. V. Photoelastic mechanical stress measurement in thin-walled glass containers.....	125
KUSHNER A. V., SHILOV A. V., NOVIKOV V. A. Indirect metod of detection of flaw in welded joints.....	129
LENEVSKY G. S., SHNIP D. V. Control of the main characteristics of the technological processes of dairy taxis on dairy commodity farms.....	134
LUNIN V. P. The role of mathematical modeling in solving of actual tasks of non-destructive control.....	139
LUNIN V. P., DOBROKLONSKAYA M. S. Estimation of probability of detecting a crack type defect in steam generator tubes	149
LUNIN V. P., KOMIAGIN M. A. Design of pulsed edry current probe for testing of multilayer products.....	155
MARCHENKOV A. Y., KREN A. P., BARAT V. A. Impact of microstructure and residual stresses on the results of acoustic-emission diagnosis of railways.....	162
OTOKA A. G., KHOLODILOV O. V. Use of various materials as a protector for edge-current transducers.....	168
PAVLYUCHENKO V. V., DOROSHEVICH E. S. Control of objects of complex shape in a magnetic field.....	177
POVOLOTSKAYA A. M., MUSHNIKOV A. N. Evolution of the magnetic parameters of 20GN hull steel specimens with different initial stress-strain states under elastic tension.....	182
POZDNIAKOV V. F., POZDNIAKOVA E. V. Estimation of the error of the optical path of the secondary laser interferometer converter.....	188
POTRAKHOV N. N., GUK K. K., BESSONOV V. B. Mobile X-ray installations for control of materials and industrial products.....	193

PRATASENIA T. A., KREN A. P., LANTSMAN G. A., DYAKOVA H. N. Evaluation of the influence of 3D-printing parameters of polymer products and their post-processing modes on the physico-mechanical characteristics of additive manufacturing products.....	199
PRUDNIKOV A. N. Risk-based approach in assessing the technical condition of main pipelines.....	205
PUDOV V. I., DRAGOSHANSKY YU. N. Research of volume structure of soft magnetic materials by the optical method.....	212
RAZOV I. O. Investigation of frequencies of free oscillations of surface and underground thin-walled pipelines of large diameter from the point of view of the theory of cylindrical shells.....	217
RIGMANT M. B., KOCHNEV A. V., KAZANTSEVA N. V., KORKH YU. V., KORKH M. K. Revealing of magnetic anisotropy in austenitic steel 09KH17N5YU after deformation by rolling.....	224
SANDOMIRSKI S. G. Use of correlations between physical-mechanical properties of steels in magnetic structural analysis.....	230
SANDOMIRSKI S. G. Calculation of magnetization of steels according to the parameters of the hysteresis loop limit: Stoletov curve.....	236
SEMENOV A. V. Eddy current probe for nondestructive testing of multi-strand stay cables.....	243
SOTNIK M. M., AFANASIEV A. A. Development and study of the conversion function of a turbidimeter with adaptive parameters.....	250
SOTSKAYA L. I., CHUDAKOV E. A., SOTSKY A. B., KRIVETSKII K. N., STASKOV N. I. Spectrophotometry of interference coating during its manufacture.....	256
STASKOV N. I., PARASHKOV S. O., CHUDAKOV E. A. Effect of annealing temperature on the optical characteristics of thin indium sulphide films.....	262
TEREKHIN I. V., SLAVINSKAYA E. A. Pulsed eddy current molten metal level sensor for billet caster	268
TRETYAKOVA V. A., AFANASIEV A. A., GOGOLINSKY V. F. Development and research of a secondary measuring converter for a pneumatic sensor of dimensional control.....	274
TYAVLOVSKY A. K., ZHARIN A. L., SVISTUN A. I., SAMARINA A. V., PANTSIALEYEU K. U., MIKITSEVICH U. A. A small-sized scanning electrometric probe for semiconductor and nanostructured materials surface defect control.....	280
KHOMCHENKO A. V., PRIMAK I. U. Parameter testing of thin-film structure by reflectometry technique.....	286

CHERNYSHEV A. V., SHARANDO V. I., KREMENKOVA N. V., PIUNOV V. D. Eddy current thickness measurement of dielectric coatings on deformed steel 12Cr18Ni10Ti.....	290
CHIZHIK S. A., KHEIFETZ M. L., VINTOV D. A., EM V. T., KARPOV I. V. Nanoindentation and determination of the strain state of a material by neutron diffraction.....	295
SHARANDO V. I., CHERNYSHEV A. V., KREMENKOVA N. V., PIUNOV V. D. Magnetodynamic thickness method of non-magnetic coatings on deformed steel 12Cr18Ni10Ti.....	301

УДК 620.179.16

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИТОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЛИСТАХ ИЗ МЕДНОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО ВАКУУМНОГО ПЕРЕПЛАВА

К. Е. АББАКУМОВ, А. В. ВАГИН, И. Г. СИДОРЕНКО

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия

UDC 620.179.16

ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF GRAPHITE INCLUSIONS IN COPPER ALLOY SHEETS OBTAINED BY DOUBLE VACUUM REMELTING TECHNOLOGY

K. E. ABBAKUMOV, A. V. VAGIN, I. G. SIDORENKO

Аннотация. Рассмотрены результаты исследования акустических характеристик графитовых включений, содержащихся в листах из медных сплавов, получаемых по технологии двойного вакуумного переплава. Показано, что моделирование таких несплошностей слоем монолитного вещества требует использования очень больших коэффициентов затухания ультразвука. Для приведения в соответствие результатов теории и эксперимента предложена модель вещества, заполняющего несплошность, со свойствами гранулированной среды.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, эхометод, теневой метод, медные сплавы, графитовые включения, коэффициент затухания, гранулированная среда.

Abstract. The results of a study of the acoustic characteristics of graphite inclusions contained in copper alloy sheets produced by double vacuum remelting technology are considered. It is shown that modeling of such discontinuities by a layer of monolithic substance requires the use of very large attenuation coefficients of ultrasound. To realize matching of the theory and experiment results, a model of a substance filling the discontinuity with the properties of a granular medium is proposed.

Keywords: ultrasonic control, reflection method, through-transmission method, copper alloys, graphite inclusions, attenuation coefficient, granular medium.

В природе медь, как и другие «благородные» металлы, встречается в самородном виде, и поэтому уже с древнейших времен полезные свойства этого уникального металла используются исключительно широко. По мере роста потребностей в добыче и производстве меди совершенствовались и технологии её получения, основной из которых в настоящее время является металлургическая, путем отделения меди от кислорода и серы [1]. Сера и кислород нерастворимы в меди, однако они образуют с медью высокотемпературные эвтектики, располагающиеся, особенно в литой меди, по границам зерен и имеющие точечное строение. После обработки давлением эвтектики разру-

шаются, и в деформированной меди сера и кислород присутствуют в виде обособленных включений, способных объединяться в плоскостные скопления типа «решеток». Обособленно существуют в этом ряду и неоднородности в виде включений графита. Появление таких внутренних дефектов металлурги объясняют попаданием в расплав разрушающихся огнеупоров. Для листов из медных сплавов, получаемых двойным вакуумным переплавом, подобные дефекты типичны, т. к. макровключения шлаковой пленки при указанной технологии встречаются значительно реже.

Применительно к обнаружению подобных неоднородностей с помощью ультразвука на первый план выдвигается задача определения одного из важнейших параметров, а именно чувствительности контроля [1–3]. Учитывая известное на сегодняшний день многообразие свойств неоднородностей, круг привлекаемых для этой цели моделей, помимо предложенной в [3] модели расслоений в виде идеальной плоскопараллельной прослойки инородного вещества, может быть существенно расширен. Однако даже в рамках подобной, но усовершенствованной модели могут быть учтены ранее не принимаемые во внимание свойства неоднородности, существенно влияющие на чувствительность контроля. Это, прежде всего, рассмотренные в [4–7] в теоретическом плане раздробленность вещества включения и нарушения адгезии на границе неоднородность – «здоровый» металл.

Последовательно, в разное время, исследовались более двух десятков образцов с внутренними дефектами, обнаруженными с помощью ультразвука при «ручном» контроле горячекатаных листов толщиной 20...40 мм из сплавов на основе меди. На предварительно шлифованной поверхности образцов в пределах условных границ дефекта намечались линии сканирования, по которым (с шагом не более 2 мм) образцы дополнительно «прозвучивались». Затем по этим линиям образец «вскрывали» и результаты «прозвучивания» сопоставляли с данными металлографического, рентгеноструктурного и химического анализов. Как показали исследования фотографий макро- и микрошлифов, на контрастных снимках отчетливо видны собственно расслоения с четко выраженным контуром собственных границ [3].

Для исследования отражающих свойств дефектов образцы прозвучивались с помощью стандартных дефектоскопов типов УД-10УА, УД11-ПУ, УД2-12, USIP-11 (KRAUTKRAMER, Германия), снабженных преобразователями из штатного комплекта с рабочими частотами 1,25; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0 МГц. В каждой точке измерялась амплитуда эхосигнала от дефекта в отношении к амплитуде эхосигнала от дна на бездефектном участке изделия. Результаты полученной обычным способом оценки влияния нестабильности акустического контакта между искателем и образцом показали, что доверительный интервал для определяемых значений амплитуд сигналов в эксперименте не выходил за пределы ± 1 Дб измеряемых величин.

Звукопрозрачность (коэффициент прохождения) дефектов определяли в контактном варианте с помощью специального держателя, снабженного подпружиненными гнездами для установки преобразователей и обеспечивающего соосность преобразователей при сканировании образцов разной толщины. Для снижения флюктуаций отдельные образцы «прозвучивались» в иммерсионном варианте на частотах 1,5; 2,0; 3,0 МГц. В последнем случае выбор частот ограничивался возможностями аппаратуры. Измерялась амплитуда импульсного сигнала, прошедшего через дефектное место образца, в отношении к амплитуде сигнала, прошедшего через бездефектное место образца. Значения коэффициентов отражения и прохождения вычислялись по специальной методике, учитывающей дифракционное расхождение пучка в акустическом тракте [3].

Значения коэффициентов отражения и прохождения затем сопоставлялись с величиной h раскрытия расслоения, которую определяли по макрошлифам как среднеквадратичное величины раскрытия в пределах действующего диаметра ультразвукового пучка. Пример такого сопоставления для одного из участков расслоения представлен на рис. 1.

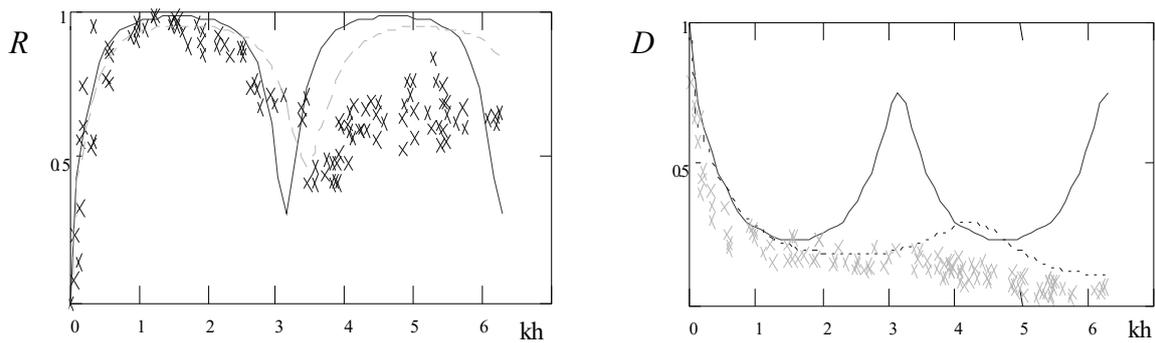


Рис. 1. Зависимости коэффициента отражения R и прохождения D при нормальном падении продольной волны в медном сплаве от волновой толщины прослойки «металлургического» графита толщиной $h = 0,2$ мм: $\times\times\times$ – экспериментальные данные; — — идеальная плоскопараллельная прослойка ($\rho = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c_l = 1,2 \cdot 10^3$ м/с; $\alpha = 1,0$ Нп/мм); - - - прослойка с «нежесткими» связями на границах ($\rho = 2,0 \dots 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_l = 2,0 \dots 2,5 \cdot 10^3$ м/с, $\alpha = 0,5 \dots 1,0$ Нп/мм, $KPN = 10^{-15}$ м³/Н, $\eta = 0,3$)

Таким образом, моделью раскатанного в один слой включения графита в листах из медных сплавов в [3] предложено считать плоскопараллельную прослойку вещества с эффективными параметрами: $\rho = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c_l = 1,2 \cdot 10^3$ м/с; $\alpha = 1,0$ Нп/мм.

Как видно, необходимость корректного сопоставления теоретических и экспериментальных данных потребовала применения компромиссного решения, следствием которого явилось довольно значительное отклонение эффективных параметров замещающей прослойки от параметров этого же материала,

известного по справочным данным. Значительно большими возможностями адаптации обладает модель, учитывающая феномен образования нарушения сцепления между металлом и веществом прослойки, оцениваемого в приближении «линейного» скольжения [4].

На рис. 1 представлены результаты сопоставления данных эксперимента и модели прослойки с «жесткой» и «нежесткой» связями на границе раздела. Как видно, возможности модели, учитывающей возможное нарушение адгезии, значительно шире.

Еще большими возможностями обладает модель, учитывающая гранулированное строение заполняющего расслоение вещества [5, 6]. Как показано в [6], учет этого факта позволяет оценить существенное воздействие условий консолидации как на значение фазовой скорости, так и на значение коэффициента затухания.

Видно, что введение нескольких дополнительных параметров позволяет получить для вещества прослойки значения плотности, скорости и, особенно, коэффициента затухания продольных волн, т. е. ряд реалистичных значений, в большей степени отвечающих особенностям нарушения структуры вещества.

Численные оценки с помощью полученных соотношений [6] проводились для широкого диапазона изменения учитываемых параметров, в первую очередь частоты и размеров включений, а их результаты представлены на рис. 2. По данным [5, 6], величина статической контактной жесткости принималась $DGN = 5 \cdot 10^6$ Н/м, а плотность $\rho = 2,65 \cdot 10^3$ кг/м³ (и другие параметры монолитного графита).

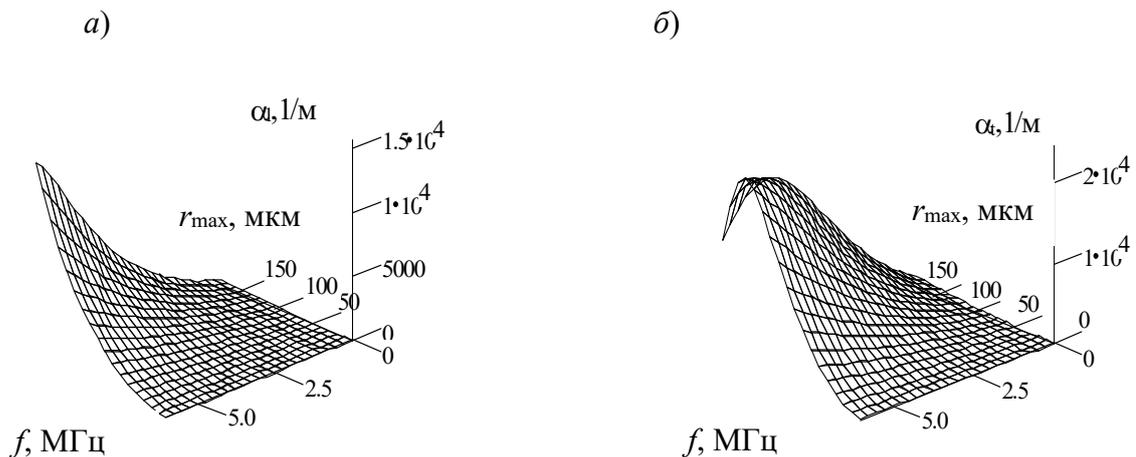


Рис. 2. Зависимости коэффициентов затухания продольных (а) и поперечных (б) волн от размеров консолидированных частиц и частоты; $r_{\min}/r_{\max} = 0,3$

В качестве примера, иллюстрирующего значения порядка величины коэффициента затухания, обусловленного контактными явлениями множества консолидированных рассеивателей, и возможности проявления «резонансных»

свойств консолидированных включений, на рис. 2 представлены результаты вычислений по формулам [4–7] значений коэффициента затухания для продольных и поперечных волн, распространяющихся через тонкий слой консолидированных включений с параметрами монолитного графита [6].

Из графиков видно, что затухание поперечных волн по величине может превосходить затухание продольных волн, что ожидалось. Абсолютные значения коэффициента затухания могут достигать в мегагерцовом диапазоне частот несколько десятков и более непер на метр. Особую важность при этом приобретает значение закона распределения микрочастиц по размерам, определению которого необходимо уделять особое внимание.

Исследованные таким образом плоскостные протяженные дефекты имеют относительно широкое распространение среди расслоений более сложной формы. Их можно отнести к классу неоднородностей с однородной внутренней структурой, образующих, несмотря на раздробленность состояния вещества, подобие «квазисплошной» среды. Поскольку хромовые бронзы по акустическим свойствам близки к бронзам других марок и мало отличаются от других медных сплавов, то полученные результаты можно было бы распространить на листовой прокат из медных сплавов, получаемых двойным вакуумным переплавом. Однако более тщательные исследования показали, что существует и другая группа идеализированных моделей неоднородностей, отличающихся значительно большей степенью перфорации внутренней структуры, представляющих собой множественные скопления соприкасающихся рассеивателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гуляев, А. П.** *Металловедение* / А. П. Гуляев. – 5-е изд., перераб. – Москва: Металлургия, 1977. – 648 с.
2. **Промышленные автоматизированные многоканальные ультразвуковые дефектоскопы для контроля толстолистового проката** / К. Е. Аббакумов [и др.]. – Ленинград: ЛДНТП, 1989. – 28 с.
3. **Аббакумов, К. Е.** Акустические свойства дефекта типа раскатанного включения графита в листах из медных сплавов / К. Е. Аббакумов, А. С. Голубев, Н. Н. Полуниин // *Дефектоскопия*. – 1980. – № 7. – С. 40–45.
4. **Аббакумов, К. Е.** Рассеяние плоских упругих волн на микрошероховатой границе раздела твердых сред / К. Е. Аббакумов // *Дефектоскопия*. – 2017. – № 7. – С. 3–13.
5. **Быков, В. Г.** Поглощение упругих волн в тонком слое зернистой среды / В. Г. Быков // *Акуст. журн.* – 1997. – Т. 43, № 3. – С. 323–328.
6. **Аббакумов, К. Е.** Волновые задачи акустических методов неразрушающего контроля / К. Е. Аббакумов, В. М. Цаплев. – Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2015. – 334 с.
7. **Бреховских, Л. М.** *Акустика слоистых сред* / Л. М. Бреховских, О. А. Годин. – Москва: Наука, 1989. – 416 с.

УДК 620.179.16

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РАВНОТОЛЩИННЫХ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДИФРАКЦИОННО-ВРЕМЕННЫМ МЕТОДОМ

В. В. АТРОЩЕНКО, Д. А. АДЖИБАЕ, М. П. САВИЧЕВ

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия

UDC 620.179.16

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR ULTRASONIC INSPECTION OF BUTT WELDED JOINTS USING THE TIME OF FLIGHT DIFFRACTION METHOD

V. V. ATROSHENKO, D. A. AJIBAYE, M. P. SAVICHEV

Аннотация. Рассматриваются вопросы разработки методики ультразвукового контроля стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом, а также критерии идентификации и интерпретации обнаруженных дефектов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, TOFD, сварка.

Abstract. The paper discusses the development of the ultrasonic inspection technique (Time of Flight Diffraction) of butt welded joints, as well as criteria for identification and interpretation of detected defects.

Keywords: non-destructive testing, ultrasonic testing, ultrasonic inspection, TOFD, welding.

С момента разработки дифракционно-временного метода (TOFD) в 1970-х гг. популярность его постоянно растет. Его основное предназначение – быстрый механизированный или автоматический контроль протяженных стыковых сварных соединений.

В отличие от эхоимпульсного метода, в основе TOFD лежит принцип регистрации сигналов, рассеянных (дифрагированных) на гранях дефекта, а не отраженных от его поверхности. Амплитуда сигнала не используется для определения размера дефекта. Размер несплошности определяется временем прохождения дифракционных сигналов. Поэтому метод TOFD применяется для поиска дефекта и для уточнения его глубины залегания и высоты, но отбраковка по результатам контроля данным методом не ведется. Для проведения отбраковки TOFD совмещают с контролем эхоимпульсным методом группой одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей или фазированной решеткой. Это позволяет также проконтролировать корневую и верхнюю части сварного шва – характерные мертвые зоны метода TOFD.

Из-за расхождения дифрагированных сигналов во всех направлениях и широкого охвата контролируемого объема при применении TOFD отсутствует необходимость в дополнительном контроле основного металла околошовной зоны на расслоения прямым преобразователем. Также этот метод чувствителен к любому типу дефектов независимо от их ориентации. Он позволяет обнару-

живать вертикально ориентированные дефекты, плохо выявляемые эхоимпульсным методом. Например, межваликовые несплавления, характерные для сварки сварных соединений с узкой разделкой кромок, отличной от 30 град.

В настоящий момент за рубежом и на территории Республики Беларусь разработаны и введены в действие все необходимые стандарты для широкого применения метода TOFD. В России нормативная документация проходит стадию утверждения. Для применения метода требуется дополнительное обучение дефектоскописта настройке и калибровке оборудования и расшифровке сканов. Обучение правильной интерпретации дефектов по сканам проводится на изображениях типовых дефектов. К сожалению, в имеющейся нормативной документации таких изображений приведено недостаточно. Актуальной задачей является разработка «атласа дефектов», содержащего соответствие результатов ультразвукового контроля методом TOFD с каждым типом сварочного дефекта. Для этих целей необходимо сравнивать полученные сканы TOFD с результатами радиографического контроля, ультразвукового контроля «традиционным» эхоимпульсным методом и металлографических исследований.

TOFD реализуется с помощью пары пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) продольных волн с одинаковыми углами ввода и широкой диаграммой направленности, позволяющей проконтролировать объект за один проход без перемещения в поперечно к шву направлении. Для толщин более 9 мм применяются ПЭП с углами ввода 50° и 60° частотами от 5 до 10 МГц [7].

Точка пресечения осей диаграмм направленности ПЭП и приемника выбирается на глубине, равной $2/3$ толщины контролируемого образца (рис. 1).

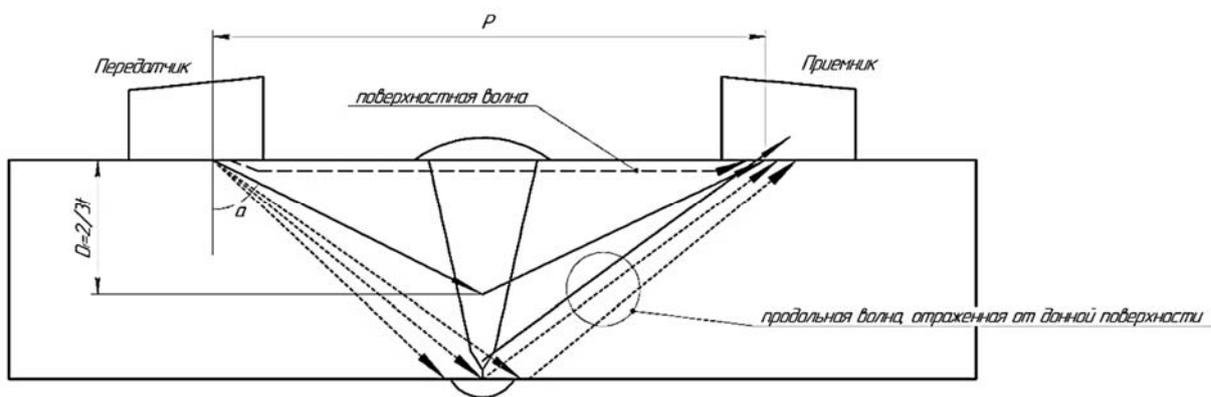


Рис. 1. Выбор расстояния между преобразователями TOFD

Для равнотолщинного сварного соединения между точками ввода приемника и передатчика P , мм, рассчитывается по формуле

$$P = 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot t \cdot \operatorname{tg}(\alpha),$$

где t – толщина стенки, мм; α – угол ввода, град.

При работе излучателя формируются подповерхностная волна, распространяющаяся непосредственно под верхней поверхностью контролируемого

объекта, и продольная волна, поступающая на приемник при отражении от донной поверхности. Поперечная волна, возникающая в результате преломления продольной волны, приходит к приемнику после отраженной продольной. Сигналы TOFD отображаются на экране в виде А-скана недетектированного сигнала. На В-скане (TOFD-скане) амплитуда сигнала отображается в градациях серого цвета. Отображение двухполярного невыпрямленного сигнала дает информацию о фазе сигналов. Подповерхностная волна и волна, отраженная от донной поверхности, всегда находятся в противофазе.

Дефект считается четко различимым и подлежит оценке, если дифракционные сигналы от верхней и от нижней граней дефекта разделяются однозначно. Если изображение TOFD нечеткое и сигнал в каналах, работающих по эхоимпульсному методу, отсутствует, то такую индикацию следует расценивать как несущественную и при анализе не рассматривать. Дефект считается плоскостным с ориентацией, отличающейся от продольной и поперечной, если он четко различим, но сигналы в каналах, работающих по эхоимпульсному методу, для данного дефекта отсутствуют. Типичный пример отображения (А-развертки) показан на рис. 2 [6].

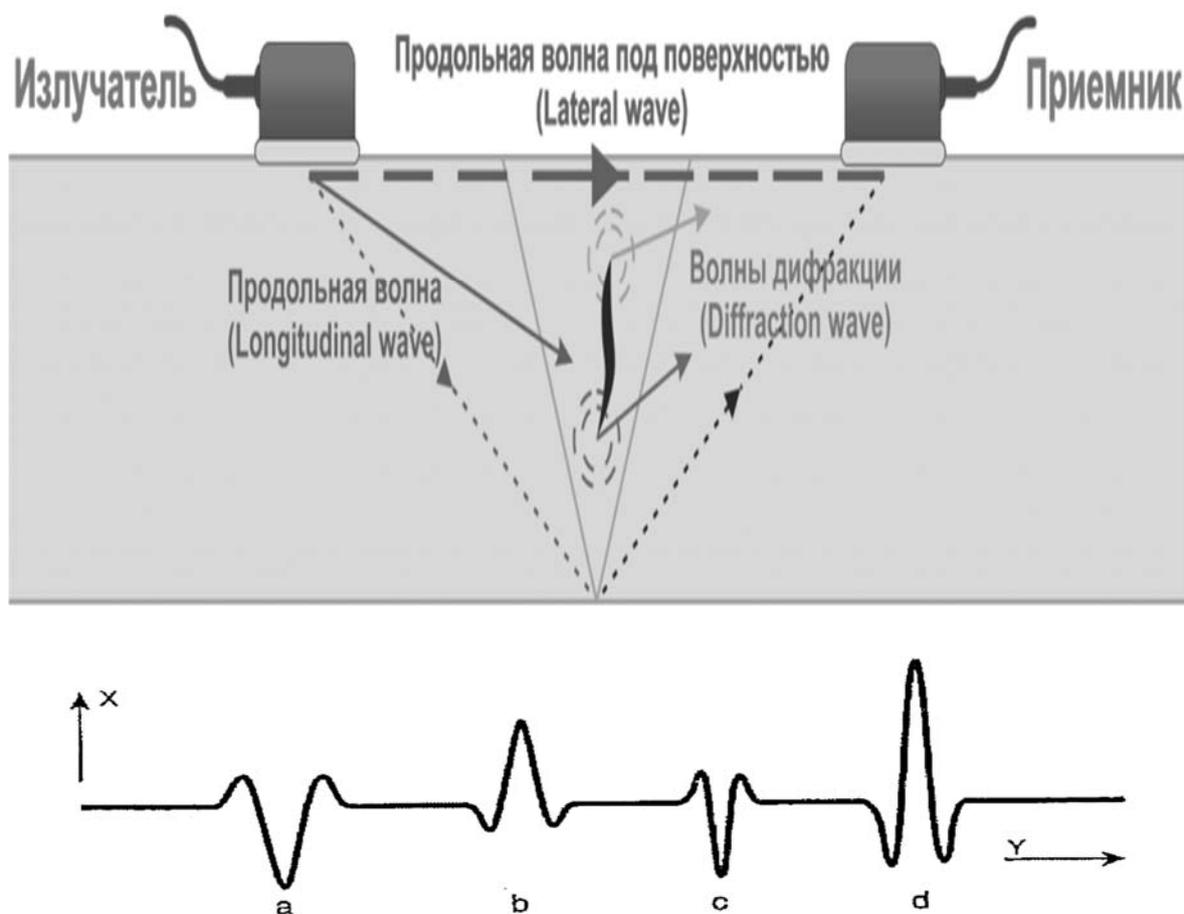


Рис. 2. Изображение дифракции волн на верхнем и нижнем краях дефекта: X – амплитуда; Y – время; a – боковая волна; b – сигнал от верхнего края несплошности; c – сигнал от нижнего края несплошности; d – эхосигнал от донной поверхности

Длину индикаций TOFD следует определять при помощи параболических курсоров, исходя из величины перемещения преобразователей вдоль сварного соединения. Реальная протяженность дефекта может отличаться от измеренной величины по причине того, что ширина диаграммы направленности ультразвукового преобразователя не равняется нулю.

Глубина залегания дефекта при проведении TOFD измеряется от поверхности более тонкой пластины сварного соединения до нижней грани дефекта. Положение верхней грани дефекта вычисляется по сигналу от дефекта с минимальным временем прихода. При УЗК равнотолщинного сварного соединения глубина залегания источника дифрагированного сигнала автоматически определяется встроенным калькулятором дефектоскопа.

Начало развертки должно быть установлено как минимум за 1 мкс до начала сигнала от поверхностной волны и заканчиваться как минимум через 1 мкс после первого сигнала от донной поверхности. Усиление сигнала должно быть таким, чтобы уровень сигнала от головной волны находился от 20 % до 30 % предельной высоты экрана. Если уровень помех превышает половину сигнала от головной волны, то необходимо выбрать преобразователи с более низкой частотой, при этом увеличится мертвая зона и снизится разрешающая способность по глубине. Чувствительность метода TOFD значительно снижается при расположении дефектов вблизи к поверхности (до $1/3$ толщины стенки от поверхности сканирования) [1–5].

При настройке чувствительности представлены способы настройки чувствительности для метода TOFD. Нормативный документ ISO 17635 регламентирует четыре уровня чувствительности: А, В, С, D. При этом достоверность контроля повышается от уровня А к уровню D. Уровень А используется для контроля сварных соединений толщиной до 50 мм. При этом для настройки чувствительности нет необходимости использовать контрольные образцы, в то время как для уровней чувствительности В, С и D проверка чувствительности проводится с помощью контрольных образцов, а для уровней С и D дополнительно необходимо проводить верификацию.

Для идентификации и интерпретации дефектов при анализе сканов TOFD необходимо обращать внимание на следующие характеристики:

- отклонение сигнала от головной волны;
- отклонение сигнала от донной поверхности;
- появление сигналов между головной волной и отражением от донной поверхности;
- фаза сигналов между головной волной и отражением от донной поверхности;
- сигналы с изменением фазы после первого отражения от донной поверхности.

Типовое изображение дефекта на TOFD-скане приведено на рис. 3 [1, 7].

Выводы.

1. В ходе работы была разработана методика проведения контроля методом TOFD стыкового сварного соединения толщиной 16 мм.

2. В ходе экспериментальных работ получены соответствия между основными видами дефектов стыковых сварных соединений и результатами контроля на сканах TOFD. Описаны признаки интерпретации по форме сигналов на скане TOFD.

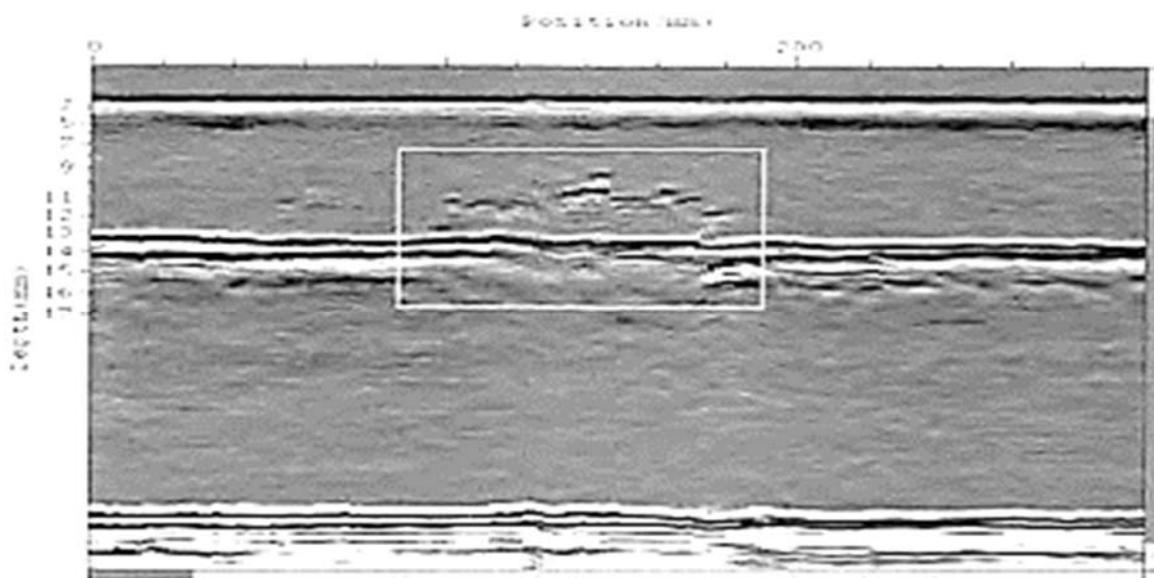


Рис. 3. Непровар в корне шва

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТБ EN 583-6-2013.** Контроль неразрушающий. Ультразвуковой метод. Ч. 6: Дифракционно-временной метод обнаружения и измерения несплошностей.
2. **СТБ EN 10863.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Применение дифракционно-временного метода (TOFD).
3. **СТБ EN 15617-2013.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Дифракционно-временной метод (TOFD). Границы допустимости.
4. **ISO 16828:2012.** Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Дифракционно-временной метод (TOFD) как метод обнаружения и определения размеров несплошностей.
5. **ISO 23279:2010.** Неразрушающий контроль сварных швов. Ультразвуковой контроль. Определение параметров индикаций в сварных швах.
6. Сайт компании Olympus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.olympus-ims.com>. – Дата доступа: 20.02.2022.
7. Приборы и методы акустического контроля: методические указания к самостоятельной работе студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» / Сост. С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко, О. С. Сергеева. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – 39 с.

УДК 534.16

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРАЕВЫХ ВОЛН ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ВЫСТУПОМ ИЛИ ПАЗОМ*А. Р. БАЕВ¹, М. В. АСАДЧАЯ¹, О. С. СЕРГЕЕВА², В. В. ПАРАДИНЕЦ¹*¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

²Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 534.16

ON THE USE OF EDGE WAVES TO TEST OBJECTS WITH A TECHNOLOGICAL LEDGE OR GROOVE*A. R. BAEV, M. V. ASADCHAYA, O. S. SERGEEVA, V. V. PARADINETS*

Аннотация. На основе анализа известных исследований по возбуждению краевых поперечных и продольных волн в объектах со сложным рельефом поверхности изучаются возможности применения полученных результатов для решения ряда прикладных задач. В частности, это касается дистанционного контроля дефектов или диагностики физико-механических свойств материала в труднодоступных местах с использованием в качестве первичной моды волны Рэлея, преобразующейся в краевую моду на технологическом выступе или основании паза изделия. Используя этот принцип, предложена конструктивная схема ультразвукового устройства для передачи (приема) поперечных волн разной частоты в исследуемые объекты.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, трансформация и рассеяние волн, поле рассеяния, краевые волны.

Abstract. On the basis of analysis of the known studies of excitation of the edge transverse and longitudinal waves in objects with a complex surface relief, the possibilities of using the obtained results for solving a number of applied problems are studied. In particular, it deals with of defect detection or diagnostics of physical and mechanical properties of material in hard-to-reach places with use as a primary mode of Rayleigh waves, transformed into an edge mode on a technological ledge or the base of a product groove. Using this principle, a design scheme of the ultrasonic device for transmitting (receiving) transverse waves of different frequencies into the studied objects is proposed.

Keywords: ultrasonic inspection, wave transformation and scattering, scattering field, edge waves.

Расширение спектра объектов, имеющих сложный рельеф и места, труднодоступные для надежной диагностики физико-механических свойств материалов, обнаружение в них трудно выявляемых дефектов требует использования более совершенных методик и средств измерений [1]. В частности, это касается дистанционного контроля материала объектов, имеющих технологический выступ или паз, когда применение традиционных методик неэффективно. Из проведенных ранее исследований [2] следует вывод о возможности использования для решения указанных задач именно возбуждаемых волной Рэлея или поверхностной волной (ПАВ) краевых волн – поперечных и

продольных [1, 3, 4]. При этом было изучено влияние радиусного перехода выступа, частоты волны f на коэффициент трансформации волны Рэлея R в краевые поперечную T и продольную L моды и обратно, а также построены поля рассеяния краевых волн $\Phi_{T,L}(\alpha, \psi)$ в объеме выступа, где α и ψ – углы, отсчитываемые в плоскости падения преобразователя ПАВ и перпендикулярно ей. Вместе с тем угол наклона поверхности передней кромки выступа по отношению к основанию образца варьировался в диапазоне $3\pi/4 \geq \varphi \geq \pi/4$. Исходя из результатов проведенных исследований и потребностей промышленного производства, сделан вывод о возможности их использования как для разработки источников (приемников) УЗК, так и схем контроля объектов с выступами, технологическими пазами, что представляет интерес для повышения эффективности традиционной дефектоскопии, структуроскопии и научных исследований.

В первой части работы рассмотрена предложенная схема ультразвукового преобразователя (приемника), в основу работы которой положен принцип трансформации поверхностной моды в краевую и обратно. Предлагается и анализируется схема зондирования объектов с выступом краевыми модами не только для выявления дефектов, но и для дистанционного определения свойств материала как на производстве, так и при проведении научных исследований. Во второй части работы осуществлена экспериментальная проверка возможности использования технологического паза или трещины в качестве своеобразного преобразователя волны Рэлея в краевую поперечную моду, используемую, например, для выявления дефектов под пазом, дистанционного мониторинга состояния металла и толщину его стенок и др.

Комбинированная схема ультразвукового устройства и некоторые способы контроля объектов с использованием эффекта трансформации волны Рэлея в краевые моды. Схемы использования эффекта трансформации упругих мод $R \rightarrow T$ на выступе поясняются на рис. 1. В первом случае (см. рис. 1, а, б) это касается разработки и использования комбинированных преобразователей для излучения (приема) поперечных волн в объем «традиционного» объекта, имеющего скорость $c_{T,O}$, под углом $\alpha_T \geq 0$. При этом контактная поверхность акустически согласующей призмы (АСП) служит для направления возбуждаемых первичным ПЭП волн Рэлея на внутреннюю поверхность выступа, где в результате трансформации волн генерируется T мода, проходящая в исследуемый объект. То есть для реализации такой схемы прозвучивания необходим подбор материалов с соответствующими акустическими свойствами, обеспечивающими минимальный шумовой фон, создаваемый при прохождении границы сред упругими модами.

Важно отметить, что в данном случае представляется возможным зондировать объект на разных частотах путем использования одного многочастотного ПЭП или размещая на поверхности согласующей призмы (1, 1') как один, так и несколько источников ПАВ (см. рис. 1).

Представленные на рис. 1, в, г схемы предназначены именно для непосредственного ввода (приема) в исследуемый объект ПАВ с целью:

- а) непосредственного выявления дефектов, лежащих как в объеме выступа, так и за ним, используя эффекты преобразования на выступе $R \rightarrow T$ и обратно;
- б) измерения физико-механических свойств материалов, включая механические напряжения, по данным скорости распространения краевых поперечных c_T и продольных c_L волн.

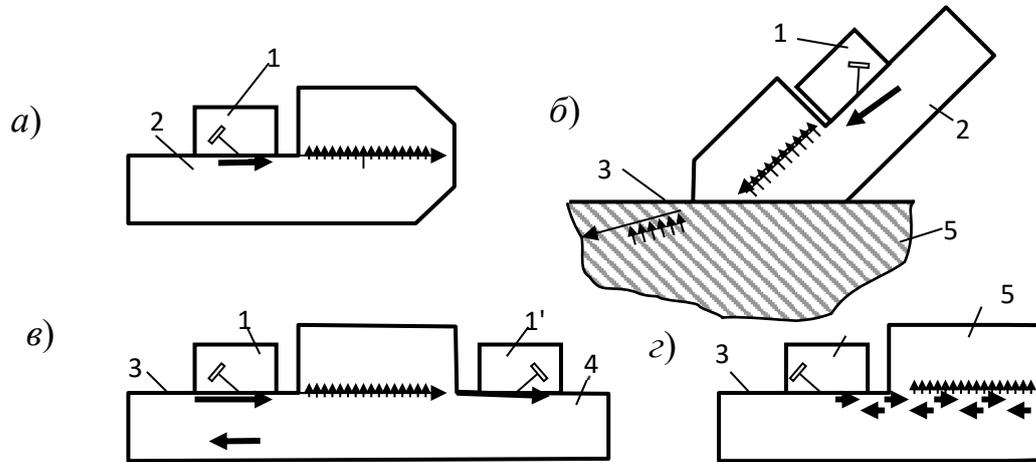


Рис. 1. Схемы устройств для излучения-приема краевых волн при $R \rightarrow T$ и $T \rightarrow R$ преобразовании на выступе (а, б) и схемы прозвучивания объектов с выступом краевой поперечной модой (в, г): 1, 1' – преобразователи ПАВ; 2 – акустически согласующая призма (АСП) для преобразования ПАВ в поперечную моду и обратно; 3 – поверхность объекта с выступом (в, г); 4 – рабочая поверхность АСП; 5 – объект контроля

Преимущество предложенного подхода по сравнению с традиционным, использующим в качестве зондирующих волн объемные моды, заключается, прежде всего, в реализации дистанционного зондирования. При этом существенно снижается ослабление акустического сигнала, а структура поля краевых волн $\Phi(\alpha, \psi)$ в объеме выступа не претерпевает значимого изменения, где α и ψ – углы, отсчитываемые в плоскости падения преобразователя ПАВ и перпендикулярно ей. Важно отметить, что путём выбора правильного положения ПЭП представляется возможным практически исключить шумовой фон, вызванный отражением акустического сигнала от радиусного (галтельного) перехода выступа, и даже с достаточно малым радиусом кривизны $r_\lambda = r/\lambda \ll 1$, где λ – длина волны ПАВ.

Отметим, что при проведении измерения скорости продольной и (или) поперечной волн применительно к оценке коррелирующих с ними физико-механических свойств материала в выступе при наличии воздействия внешних полей, температуры и др. используются данные о времени прохождения краевых переотраженных от боковых стенок выступа мод, расположенных на расстоянии b друг от друга:

$$c_L = bn / \Delta t_L; \quad c_T = bm / \Delta t_T,$$

где n, m – количество проходов сигнала между стенками выступа в прямом и обратном направлении. Величины Δt_L и Δt_T легко измеряются с использованием стандартного оборудования.

О возможности контроля объектов с технологическим пазом или модельной трещиной. Прохождение по поверхности технологического паза или трещины ПАВ [3, 4] и их трансформацию на вершине в T моду и обратно можно использовать в ряде случаев для моделирования процессов формирования упругих мод в объекте с нулевым углом выступа ($\gamma \sim 0^\circ$), что ранее не изучалось в плане особенностей проявления механизма трансформации волн. В то же время раскрытие новых возможностей использования изучаемого явления для повышения эффективности акустического контроля и диагностики твердых тел на наличие потенциально опасных дефектов представляет значительный интерес.

Методические особенности измерений. Принципиальные схемы исследований особенностей трансформации мод на трещине ($R \rightarrow T$ и $T \rightarrow R$), а также изучение возможностей использования технологического пропила в качестве трансформатора мод для выявления объемных дефектов приведены на рис. 2 и 3. В качестве объекта исследования использованы образцы из дюрала. Один из них, прошедший метрологическую поверку, выполнен с реальной усталостной трещиной (см. рис. 2) глубиной $h = 400 \dots 500$ мкм с раскрытием, равным 8 мкм. В этом случае для излучения и приема зондирующего импульса использованы преобразователи волн Рэлея, а также, что важно, преобразователь сдвиговых волн, расположенный непосредственно под трещиной для определения амплитуды краевой T моды. Последний также используется для исследования обратного преобразования мод. При проведении исследований излучается волна Рэлея, часть энергии которой отражается от устья трещины, а другая распространяется по стенке трещины и трансформируется в T моду, которая переотражается между стенками пластины и, в результате обратного преобразования, в качестве волны Рэлея поступает на приемные ПЭП. В другом образце (см. рис. 3), предназначенном для изучения возможностей выявления расположенных под технологическим пазом объемных дефектов с помощью краевой T волны, трансформированной на вершине паза из поверхностной моды, глубина паза 3 мм и ширина 300 мкм. В качестве отражателей (модельных дефектов) использованы цилиндрические отверстия диаметром 2 мм. Рабочая частота преобразователей волн Рэлея $f = 5$ МГц. В качестве источника электрических импульсов, их приемника и синхронизирующего устройства применена стандартная аппаратура, используемая в [2].

Результаты исследований. Данные прозвучивания образца с естественной усталостной трещиной согласно представленной на рис. 2 схеме позволили выявить следующее. Во-первых, как показывает характерная осциллограмма прозвучивания трещины поверхностной волной в режиме эхо и теновом режиме, сигнал-отклик представляет собой серию импульсов, приходящих в виде ПАВ на приемный ПЭП.

При этом в режиме эхо наблюдаемый на осциллограмме первый импульс является отражением ПАВ от устья трещины, второй формируется в результате прохождения ПАВ по поверхности трещины и трансформации ее в окрестности

вершины в поперечную моду с последующим рассеянием, а затем, после отражения от противоположной поверхности образца, возвращается на ПЭП в обратном порядке. Таким образом, ПАВ дважды проходит вдоль стенок трещины и дважды трансформируется на ее вершине в другую моду и обратно. Последующие же импульсы, принимаемые ПЭП, генерируются в результате периодической трансформации на трещине переотражаемых в плоском слое импульсов T моды. То есть в этом случае основная энергия импульса сконцентрирована в поперечной моде, и при очередном переотражении от донной поверхности образца она трансформируется в ПАВ именно в окрестности вершины трещины и возвращается к приемному ПЭП. Исходя из полученных данных, временной интервал между первым и вторым импульсами t_{21} , а также между вторым и третьим импульсами t_{32} , наблюдаемыми на осциллограмме, будет равен: $t_{21} = 2 (h/c_R + (d - h)/c_T) + \Delta t$; $t_{32} = h/c_R + 2d/c_T$, где d – толщина образца; h – глубина трещины; Δt – временной сдвиг, обусловленный отражением ПАВ от стенки трещины. Отсюда следует заключить, что в некоторых случаях возможно судить не только о наличии, но и глубине трещины по величине временных интервалов между переотраженными сигналами как в теновом, так и в эхо режимах. Необходимо учесть, что в зависимости от степени контакта стенок трещины (граничных условий) величина c_R может уменьшаться на 1 %...2 %.

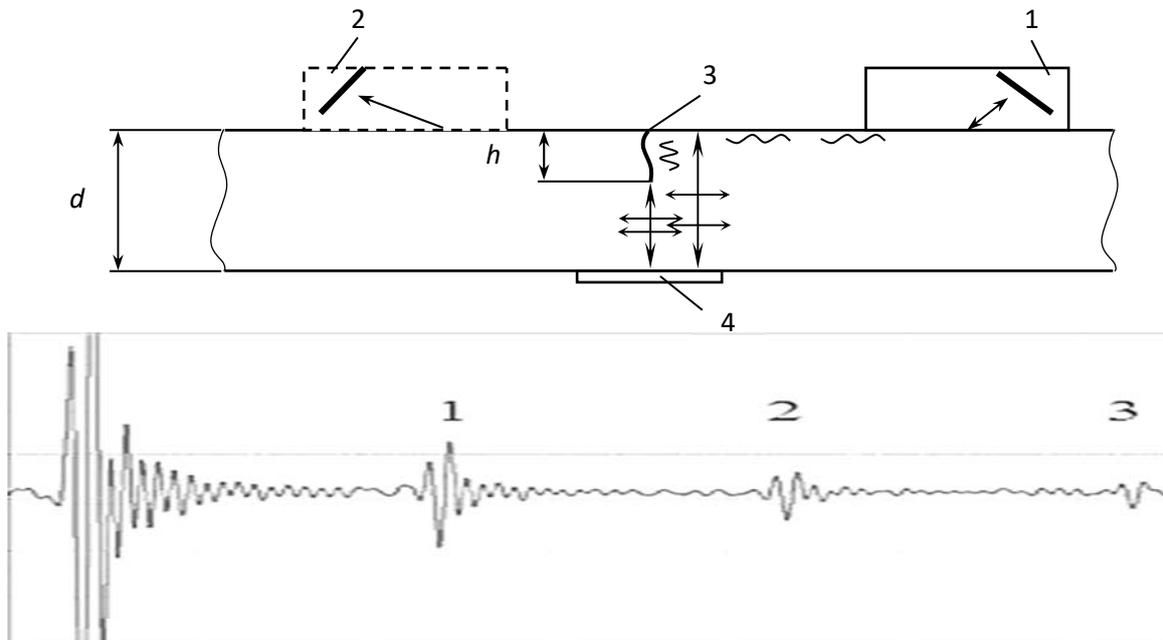


Рис. 2. Схема экспериментального исследования акустического тракта применительно к трансформации $R \rightarrow T$ и $T \rightarrow R$ мод на усталостной трещине и характерная осциллограмма сигнала отклика: 1 – излучающий ПЭП; 2 – принимающий ПЭП волн Рэлея; 3 – имитатор технологического паза или трещины; 4 – ПЭП нормальных сдвиговых волн на поверхности образца

В случае, когда источником является ПЭП сдвиговых волн, количество регистрируемых ПЭП волны Рэлея импульсов существенно возрастает, что

обусловлено слабой расходимостью T волны. Установлено, что варьирование угла между плоскостью поляризации преобразователя сдвиговых волн и плоскостью трещины до $\varphi = 45^\circ \dots 50^\circ$ не оказывает существенного влияния на амплитуду волны в пределах $\sim 2 \dots 3$ дБ. В отсутствие же трещины уровень сигнала на приемном ПЭП сравним с измерительным шумом.

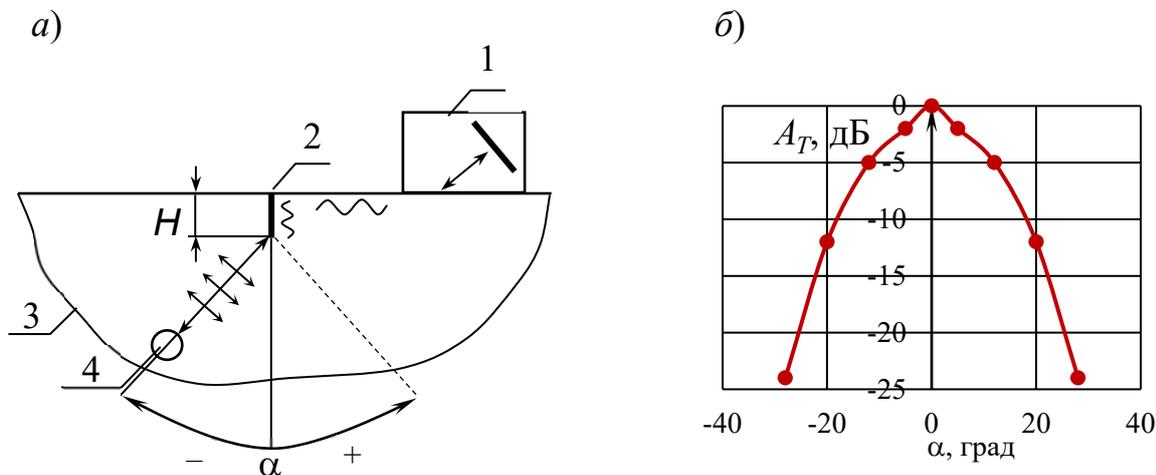


Рис. 3. Схема экспериментального моделирования отраженного от модельного дефекта импульса T волны, трансформированного в ПАВ на вершине паза (б): 1 – ПЭП поверхностной волны; 2 – паз глубиной 3 мм и шириной 0,3 мм в образце из дюралюминия; 3 – образец; 4 – один из цилиндрических отражателей диаметром 2 мм; $f = 5$ МГц

Таким образом, трещину можно рассматривать как своеобразную «акустическую антенну», весьма чувствительную к горизонтально поляризованным сдвиговым волнам, регистрация которых равноценна с обеих сторон трещины. Рис. 3 иллюстрирует принципиальную возможность использования технологических выемок, пропилов, а также трещин для обнаружения дефектов, расположенных под ними, с помощью трансформированной из ПАВ и рассеянной на вершине пропила поперечной моды. Чувствительность такого способа выявления дефектов, расположенных на расстоянии до 10...15 мм от вершины пропила, может достигать нескольких миллиметров квадратных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.
2. Formation of of Acoustical Field of a Rayleigh-Wave Transducer in an Object with Protrusion / A. R. Baev [et al.] // With a Right Angle Russian Nondestructive Testing Journal. – 2014. – Vol. 50, № 6. – P. 25–36.
3. **Аббакумов, К. Е.** Распространение волны Рэлея вдоль границы твердого тела с трещиной / К. Е. Аббакумов, В. А. Бритвин, Р. С. Коновалов // Изв. ЛЭТИ. – 2009. – № 2. – С. 57–64.
4. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / Ю. В. Гуляев [и др.]. – Москва: Наука, 1991. – 263 с.

УДК 534.2/.4

**ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН
В СВЕТОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ***А. Р. БАЕВ, А. Л. МАЙОРОВ, А. Ю. БУРНОС, Г. И. РАЗМЫСЛОВИЧ,
М. В. АСАДЧАЯ*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 534.2/.4

**PULSE-LASER EXCITATION OF ELASTIC WAVES IN
A LIGHT-ABSORBING MEDIUM***A. R. BAEV, A. L. MAYOROV, A. Y. BURNOS, G. I. RAZMYSLOVITCH,
M. V. ASADCHAYA*

Аннотация. Экспериментально изучены особенности импульсно-лазерного возбуждения ультразвуковых волн с использованием двух видов светопоглощающих сред (СПС), выполненных на полимерной (твердой) основе и на масляной основе (наномагнитные жидкости). Выявлены характерные зависимости изменения амплитуды и формы возбуждаемых импульсов от толщины слоя СПС на полимерной основе $h = 0,1 \dots 0,5$ мм и высоты L расположения источника лазерного излучения относительно поверхности СПС для контактирующих с СПС материалами световода и звукопровода (стекло, оргстекло, воздух). Установлены особенности изменения коэффициента оптоакустического (ОА) преобразования в наномагнитной жидкости при изменении коэффициента поглощения излучения за счет варьирования концентрации дисперсной фазы магнетика в диапазоне до 8 %. Результаты исследований представляют интерес для разработки комбинированных ОА устройств применительно к контролю объектов со слоистой и неоднородной структурой.

Ключевые слова: импульсно-лазерное возбуждение ультразвуковых волн, светопоглощающие слои.

Abstract. The peculiarities of pulse-laser excitation of ultrasonic waves using two types of light-absorbing media (LAS) made on a polymeric (solid) basis and on an oil basis (nano-magnetic liquids) have been studied experimentally. For the first time the characteristic dependences of changes in the amplitude and form of excited pulses on the layer thickness of LAS on a polymeric basis $h = 0,1 \dots 0,5$ mm and the height L of the laser radiation source, relative to the LAS surface for the materials contacting with it of the light and sound conductor (glass, plexiglass, air) were revealed. The peculiarities of changes in the OA conversion coefficient in the nano-magnetic liquid were also found when the radiation absorption coefficient varies due to varying the concentration of the dispersed phase of the magnetite in the range of up to 8 %. The research results are of interest for the development of combined OA devices as applied to the control of objects with a layered and heterogeneous structure.

Keywords: pulsed-laser excitation of ultrasonic waves, light-absorbing layers.

Одно из перспективных направлений неразрушающего контроля изделий и материалов состоит в применении для этих целей возбуждаемых импульсно-лазерным излучением ультразвуковых волн (УЗВ) [1], что реализуется несколькими методами. Один из них состоит в том, что в качестве преобразователя импульсного лазерного излучения (ЛИ) в ультразвуковые колебания служат

светопоглощающие слои (СПС). В результате нестационарного нагрева в их объеме возникают термонапряжения $\sigma(t)$ и генерируются акустические импульсы $A(t)$, вводимые в исследуемые объекты для выявления несплошностей и структуроскопии материалов по данным амплитудных, спектральных характеристик, а также дисперсии скорости звука различных мод. Несмотря на то, что для реализации методики измерений необходимо создание акустического контакта, возбуждение УЗВ происходит при сравнительно малой энергии лазерных импульсов ($\sim 50 \dots 100$ мкДж), а также их длительности $\Delta t \sim 10$ нс и менее. При работе в сочетании с широкополосными преобразователями (ПЭП) представляется возможным не только расширить возможности контроля структуры гетерогенных и слоистых сред по данным спектральных характеристик зондирующего сигнала, но обеспечить высокую точность измерения скорости поверхностных и подповерхностных волн (до нескольких наносекунд). Необходимо отметить значительный вклад в эту область исследований, внесенный группой под руководством д-ра физ.-мат. наук, проф. А. А. Карабутова (Международный лазерный центр, г. Москва) [2]. Проведенные ранее совместно с ним на базе Международного лазерного центра (г. Москва) исследования позволили достаточно детально выявить механизм генерации УЗВ в наноманитных жидкостях (НМЖ) на основе керосина и минерального масла в предельном диапазоне варьирования концентрации $Q = 0 \dots 27$ % [3]. Эти данные получены в режиме эхо, т. е. при одностороннем вводе-приеме лазерного и акустического импульса. В реальной ситуации требуется организация теневого режима прозвучивания объекта, поясняемая согласно схеме, приведенной на рис. 1: ЛИ \rightarrow световод \rightarrow СПС \rightarrow объект контроля \rightarrow приемный ПЭП. Причем во многих случаях в качестве СПС используются твердые тела, как, например, в [4]. Оптимизация же оптоакустического (ОА) тракта и конструкций реализующих метод преобразователей требует проведения соответствующих исследований.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном моделировании поясняемой на рис. 1 схемы функционирования ОА-преобразователей, включая влияние контактирующих с СПС сред, имеющих удельные акустические сопротивления $\mathcal{R}_{c,z} = \rho_{c,z} c_{c,z}$, толщины СПС h , где индекс c соответствует материалу световода, а z – звукопровода.

Методика исследований и моделирования. Объектом исследования или преобразующего импульсно-лазерное излучение в продольные волны материала являются микронеоднородные среды из светопоглощающего полимера толщиной $h = 0,05 \dots 0,5$ мм и образцы НМЖ с минеральной основой и концентрацией дисперсной фазы $Q = 0,23 \dots 8$ %. Лазерное излучение имеет длину волны $\lambda = 1,06$ мкм. При моделировании в качестве варьируемых материалов световода и звукопровода использованы кварцевое стекло, оргстекло и воздух.

Представленная на рис. 1 схема измерений работает следующим образом. ЛИ, распространяясь через оптоволоконный кабель и световод, генерирует в СПС продольные волны, поток энергии которых направлен преимущественно вдоль акустической оси. Последние через звукопровод и иммерсионную

жидкость (воду) проходят через протектор на широкополосный приемник, а затем на электронный блок обработки информации.

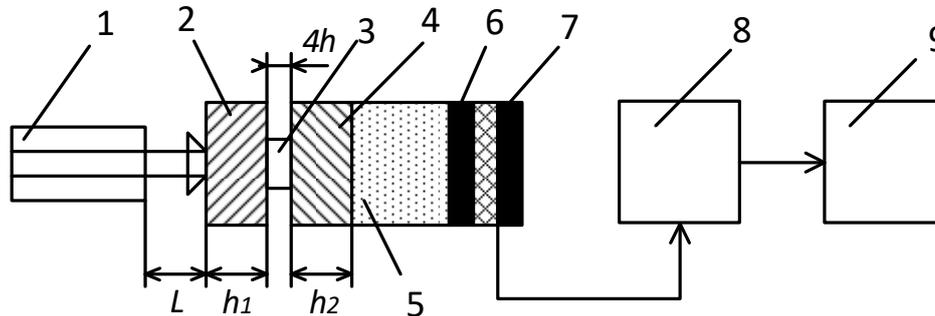


Рис. 1. Схема установки: 1 – оптоволоконный кабель; 2 – световод; 3 – СПС; 4 – звукопровод; 5 – иммерсионная среда; 6 – протектор; 7 – пьезоэлемент; 8 – осциллограф; 9 – компьютер

Результаты исследований. На основе изучения возбуждаемых лазерным импульсом УЗ-колебаний в СПС с полимерной основой установлены характерные зависимости изменения амплитуды и формы возбуждаемых импульсов от толщины СПС $h = 0,1 \dots 0,5$ мм и высоты L расположения источника лазерного излучения, передающегося через световодный кабель, относительно наружной поверхности СПС при различном соотношении удельных акустических сопротивлений $\mathcal{R}_{с,з}$ материалов световода и звукопровода по отношению к удельному акустическому сопротивлению светопоглощающего слоя $\mathcal{R}_{СПС}$.

Как видно, полученные осциллограммы импульсов, характерные для различных вариантов согласования акустических материалов СПС с звукопроводом и световодом, в ряде случаев могут отличаться как по амплитуде, так и по форме сигнала, а также длительности первой осцилляции. При этом изменение максимальной амплитуды импульса достигает 2–2,5 раза, а величины Δt до 25 %...30 %. Это играет важное значение при использовании рассматриваемого метода для измерения скорости той или иной моды или ее спектра в исследуемом объекте при диагностировании его структуры. Как показывает анализ процесса формирования акустического сигнала для условий, когда расстояние между источником излучения и СПС $L = \text{const}$, значительное влияние на указанные параметры импульса вносит различие коэффициентов прохождения УЗВ границы с водой $D_{зж} = 2\mathcal{R}_z (\mathcal{R}_z + \mathcal{R}_{жс})^{-1}$. Так, например, для случая, когда звукопровод – стекло или оргстекло, их величины $D_{зж}$ отличаются в $\approx 3,5$ раз. В то же время при $D_{зж} \rightarrow 1$ и наличии контакта СПС – вода, где световоды играют одновременно роль акустической нагрузки, наблюдается значимое искажение формы импульса, что затрудняет использование такой схемы ОА-преобразования для ряда измерительных процедур (рис. 2).

Проведенные исследования (рис. 3) показали существенный рост (в 4,5–5 раз) амплитуды A/A_0 сигнала в зависимости от высоты расположения источника ЛИ, которая при $30 < L^* = L/d < 100$ имеет характерное плато, если в качестве световода служит воздух. Этот эффект обусловлен тем, что с ростом L

возрастает площадь $S = \pi r^2$ или апертура источника ЛИ, что и приводит к росту акустического сигнала. Дальнейшее повышение эффективности работы преобразователя с СПС может быть достигнуто при корректном выборе материала светопровода. Так, если это стекло или кварц, для которых коэффициенты преломления света $n \approx 1,5...1,6$, то следует ожидать изменения хода функции $A(L)$, что сопровождается «затягиванием» момента появления плато у этой кривой, имеющим место при больших значениях L , а также повышением направленности возбуждаемых УЗВ.

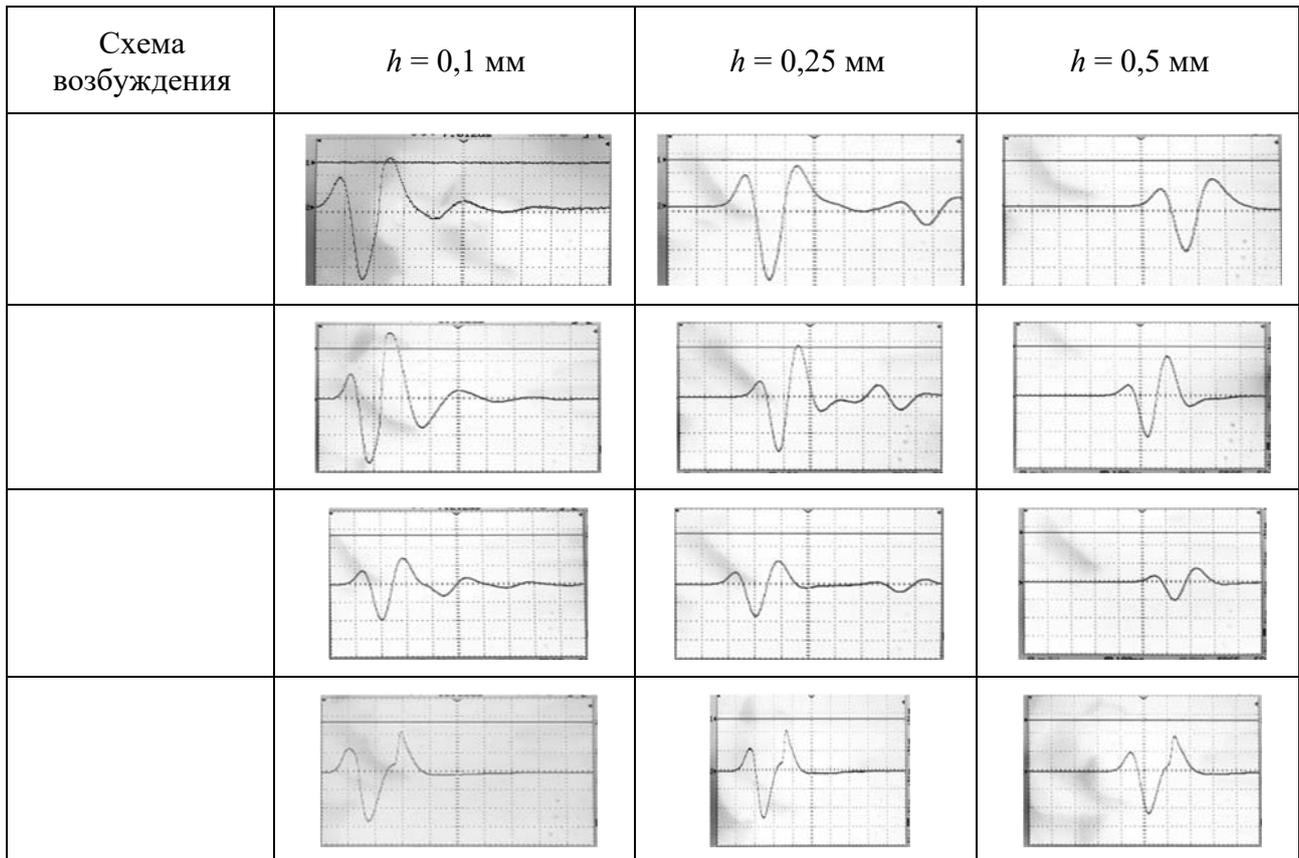


Рис. 2. Схемы импульсно-лазерного возбуждения УЗВ и их осциллограммы при различной толщине СПС и контактирующих с ним материалов

Наномагнитная жидкость как СПС. В данном случае поток энергии лазерного луча диаметром в поперечном сечении 3 мм через светопроводы падает на поверхность НМЖ, а возбуждаемые колебания фиксируются пьезоприемником на рабочей частоте $f = 4$ МГц. Приведенные на рис. 4 зависимости сигнала УЗВ от концентрации магнитной фазы в НМЖ имеют существенное различие, связанное с граничными условиями в области контакта световода с НМЖ. В этом случае реализована свободная граница (воздух – НМЖ) и жесткая (стекло – НМЖ) по отношению к нормальной составляющей возбуждаемых на границе колебаний. Причем пространственное распределение источников колебаний определяется коэффициентом поглощения ЛИ α_1 . Именно параметр $b = (\alpha_1)^{-1}$ определяет размер распределенных источников УЗВ, сказывающихся на формировании импульса. Как показывает анализ физических

процессов при ОА, обе зависимости $A(Q)$ имеют максимум, амплитуда которого и положение на оси Q , а также ход кривых при $Q > Q^*$ определяются комплексом теплофизических и акустических процессов. В особенности это связано с существенным отличием фазового сдвига (на π) отраженных от указанной границы волн. Обращено внимание на необходимость прояснения различия и проявления механизма ОА-преобразования для двух рассматриваемых схем возбуждения УЗВ с помощью имеющих разную структуру СПС, что представляет интерес для разработки комбинированных схем ОА-диагностики материалов с неоднородной и слоистой структурой.

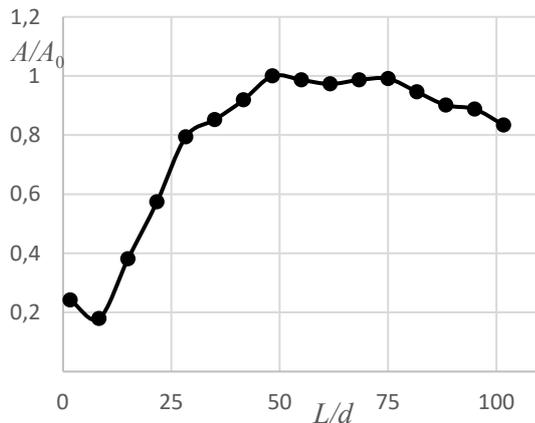


Рис. 3. Амплитуда УЗВ от высоты расположения L источника лазерного излучения диаметром над СПС, выполненным на полимерной основе

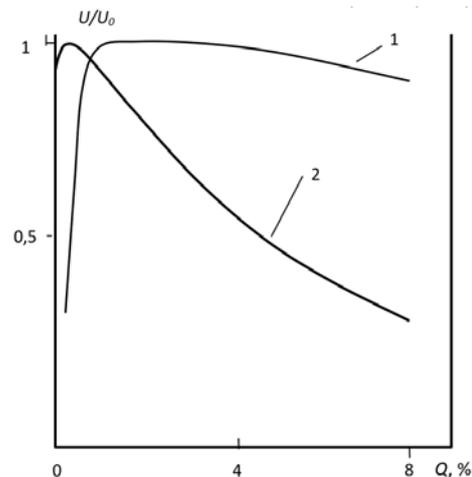


Рис. 4. Нормализованная зависимость сигнала УЗВ от концентрации магнитной фазы в НМЖ при прямом воздействии ЛИ на границу с НМЖ световода из стекла (1) и воздуха (2)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Minchalin, J.-P.** Laser ultrasonics: from the laboratory to industry / J.-P. Minchalin // Rev. of Progress in Quantitative NDE. – 2003. – № 23A. – P. 3–31.
2. **Гусев, В. Э.** Лазерная оптоакустика / В. Э. Гусев, А. А. Карабутов. – Москва: Наука, 1991. – 304 с.
3. **Карабутов, А. А.** Лазерный оптико-акустический метод локального измерения упругих модулей композиционных материалов, упрочненных частицами / А. А. Карабутов, Л. И. Кобелева, Н. Б. Подымова // Техническая акустика. – 2010. – Вып. 15. – С. 13–21.
4. Особенности возбуждения упругих волн в магнитных жидкостях лазерным излучением / А. Р. Баев [и др.] // Магнитная гидродинамика. – 1996. – № 3. – С. 23–30.

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

УДК 621.91.01

ОСНОВЫ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЕ ПРЕДМЕТОВ С УЧЕТОМ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

***Б. М. БАЗРОВ¹, Н. А. РОДИОНОВА¹, М. Л. ХЕЙФЕЦ², В. Л. СОЛОМАХО³,
В. Л. ГУРЕВИЧ⁴***

¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН
Москва, Россия

²Институт прикладной физики НАН Беларуси

³Белорусский национальный технический университет

⁴РУП «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Беларусь

UDC 621.91.01

FOUNDATIONS OF THE THEORY OF BASED AND FIXING OF SUBJECTS TAKING INTO ACCOUNT OF NEW TECHNOLOGIES

***B. M. BAZROV, N. A. RODIONOVA, M. L. KHEIFETZ, V. L. SOLOMAKHO,
V. L. GUREVICH***

Аннотация. Актуализируются основы теории базирования с учетом пересмотра существующего описания из теоретической механики посредством положения трех координатных точек; для перехода к новому описанию из теории машин и механизмов путем лишения предмета базирования степеней свободы (подвижности) в технической системе (конструкторской, технологической, измерительной). Показывается, как проектирование технологии производства изделия и измерения его характеристик проводится в системе, включающей оборудование и средства оснащения в качестве механизмов, замыкающим звеном которых являются предметы базирования.

Ключевые слова: теория базирования, технология производства изделия, теоретическая механика, теория машин и механизмов.

Abstract. The basics of basing theory are updated taking into account the revision of the existing description from theoretical mechanics by means of the position of three coordinate points; to go to a new description from the theory of machines and mechanisms by depriving a subject of basing degrees of freedom (mobility) in a technical system (design, technological, measuring). It is shown how the design of the technology for manufacturing the product and measuring its characteristics is carried out in a system that includes equipment and equipment as mechanisms, the closing link of which are basing objects.

Keywords: theory of based, technology for manufacturing the product, theoretical mechanics, theory of machines and mechanisms.

Введение. При кастомизации – адаптировании продукции под определенного потребителя, с учетом его интересов и требований, сам потребитель выступает в качестве дизайнера и инженера, а по его запросам может контролироваться, управляться и изменяться производственный процесс [1, 2]. Кастомизации способствует современный уровень цифровизации промышленного производства [3, 4], обеспечивающий переход к информационным технологиям создания, поддержки и применения единого информационного пространства

продукции во времени, на всех этапах жизненного цикла изделия: от его проектирования и изготовления до эксплуатации и утилизации [5, 6].

Сочетание в глобальной сети информационных технологий, современного производства с использованием робототехники на основе машинного обучения и искусственного интеллекта формирует предпосылки к созданию заводов с полной автоматизацией производственных этапов [3–6].

Анализ технологии и метрологии современного производства. Эффективность производства изделий в первую очередь зависит от уровня технической подготовки производства, включающей конструкторскую, технологическую, метрологическую и другие подготовки, основу которых составляют технологии [7, 8]. В процессе эволюционного развития машиностроения сформировались три вида технологий: единичная, типовая и групповая, имеющие свои преимущества и недостатки.

Применение *единичной технологии* позволяет строить оптимальный процесс, но приводит к большим затратам времени на его разработку. *Типовая технология*, снижая объем и сроки подготовки производства, не обеспечивает оптимального процесса для каждой детали одного типа. *Групповая технология*, увеличивая размер партии, требует повторяемости выпуска изделий, что существенно сужает область ее эффективного применения. Кроме того, все эти виды технологии не обладают гибкостью, т. к. не позволяют в случае необходимости изменять маршрут [7, 9].

Поэтому, с учетом необходимости адаптирования технологии к изделию и его функциональному назначению, возникает необходимость в принципиально новом виде – предельно формализованной *модульной технологии* [7]. В свою очередь для унификации производства по модульной технологии требуются единые классификация и кодирование изделий как объектов производства, так и эксплуатации, на основе представления их предметами или операциями над ними, используя модульный подход при детализации конструкций изделий, их комплектующих деталей и элементов [2, 7].

Для решения поставленных задач необходимо, в первую очередь, получить информацию о характеристиках конструкций изделий (КИ). При графическом описании значительная часть многочисленных характеристик представлена в неявном, слабо формализованном виде. Так, на чертеже детали не указываются число поверхностей, их функциональное назначение и связи между ними. Для устранения отмеченных недостатков предлагается описание КИ *совокупностью модулей* [7].

В качестве модулей КИ примем модуль группы деталей (МД) изделия и модуль группы поверхностей детали – модуль поверхностей (МП). Объединение деталей в МД и поверхностей детали в МП определяется этапом жизненного цикла изделия, т. к. на разных этапах МД и МП выполняют разные роли и представляются разным составом деталей и поверхностей. В результате изделие может быть представлено совокупностью МД, а если все детали заместить совокупностями МП, то КИ можно представить множеством МП. Модульное строение КИ можно описать графом иерархической структуры, вершиной которого является базовая деталь. Например, у металлорежущего станка базовой

деталью является станина [2].

Размерные связи играют большую роль как в создании изделия, так и в процессе его функционирования, а размерные цепи возникают при решении разнообразных конструкторских, технологических и метрологических задач в машиностроении. Поскольку размерные цепи возникают в результате выбора баз и базирования, то теории размерных цепей должен предшествовать теоретический анализ основ базирования [8, 9].

Следует подчеркнуть, что машиностроение отличается огромным, непрерывно растущим разнообразием продукции, технологий и широкой цифровизацией производства. Поэтому *целью работы* является дальнейшее совершенствование основ теории базирования, включая введение новых понятий, их определений, уточнения известных с использованием модульного принципа в технике и технологиях, в условиях современного производства, его системной конструкторской, технологической и метрологической подготовки [10, 11].

Базирование, базы и опорные точки. Базирование находит широкое применение в машиностроении как при проектировании изделий, так и при их изготовлении, контроле и диагностике и оказывает большое влияние на их качество. В ГОСТ 21495–76, последний раз актуализированном в 1990 г., приведены термины и определения, раскрывающие содержание процесса базирования.

Однако за прошедшие десятилетия после его выхода в результате развития техники и технологии появилась необходимость в пересмотре некоторых понятий и введении новых, уточняющих описание процесса базирования [11, 12].

Согласно действующему ГОСТ 21495–76 *базирование* – придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Во-первых, при таком определении отсутствуют деталь и сборочная единица, которые тоже подвергаются базированию при сборке изделия.

Поэтому в понятие базирования вместо заготовки и изделия следует внести слово **предмет базирования**, под которым будем понимать заготовку, изделие, деталь, сборочную единицу.

Во-вторых, надо отметить, что фактически базирование выполняет две функции: *лишение предмета степеней свободы* и *придание ему требуемого положения* относительно заданной системы координат.

При этом возникают случаи, когда требуется выполнение только одной функции.

Например, при базировании диска в трехкулачковом патроне, при лишении его возможности поворота вокруг его оси, не ставится задача обеспечения заданного углового положения, а требуется только лишить его степени свободы по этой координате.

Кроме того, в одних случаях требуется лишение предмета базирования всех степеней свободы, а в других случаях – предмет лишается одной или нескольких степеней свободы.

С учетом этого предлагается формулировка понятия «базирование»: **базирование** – лишение предмета степеней свободы и придания ему требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Следующим важным термином является «база». Согласно стандарту *база* – поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования.

Базы делятся на *явные* (материальные) и *скрытые* (нематериальные). К первым базам относятся поверхности, сочетание поверхностей, риски, а также ось и точка. К нематериальным базам относятся воображаемая точка, ось, линия, плоскость, являющиеся элементами симметрии, которые материализуются в виде точек, рисок [8, 9].

В связи с этим будем понимать под **базой** – поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, или элемент симметрии предмета базирования, используемые для базирования.

Элементами симметрии базирования являются точка симметрии на линии, центр симметрии на плоскости, центр симметрии в пространстве, линия симметрии, плоскость симметрии, ось симметрии.

Следующим термином, требующим усовершенствования, является «скрытая база».

Согласно стандарту *скрытая база* – база в виде воображаемой плоскости, оси или точки. Так как скрытая база – это нематериальная база, то запишем формулировку скрытой базы в следующем виде. **Скрытая база** – элемент симметрии предмета в виде точки симметрии на линии или центра симметрии на плоскости, или линия симметрии или центра симметрии в пространстве, или плоскость симметрии, или ось симметрии.

Далее следует внести изменение в обозначения опорной точки [10, 11].

Согласно существующему стандарту *опорная точка* – точка, символизирующая одну из связей заготовки или изделия в выбранной системе координат. В связи с тем, что в известном понятии базирования отражается только одна его функция – определение положения предмета базирования в выбранной системе координат, опорная точка обозначается знаком.

В новой формулировке понятия «базирование» одной из выполняемых им функций является лишение предмета базирования степеней свободы. Опорная точка должна показывать лишение предмета одной степени свободы, т. е. перемещения по одной координате.

Тогда ее определение: **опорная точка** – точка, символизирующая лишение возможности перемещения предмета по одной координате в выбранной системе координат.

В изделии проектная схема базирования превращается в конструкторскую схему базирования.

Конструкторская схема базирования – проектная схема базирования с опорными точками, выполненными в виде опорных элементов.

Соответственно, также при обработке и сборке изделия, измерениях его характеристик и деталей в технологическом процессе и при эксплуатации определяются технологическая и измерительная схемы базирования.

Заключение.

1. Проектирование и производство как отдельных конструктивно-технологических элементов деталей, так и кастомизированного изделия в целом с позиций его эксплуатации по функциональному назначению и мониторинга состояния путем контроля и диагностики в современном производстве и при эксплуатации целесообразно строить на основе использования модульного принципа в технике и технологии.

2. Унификация проектных решений как для конструкции самого изделия, так и оборудования и средств технологического и метрологического оснащения при его изготовлении обеспечивает вне зависимости от типа производства (единичное, серийное, массовое) переход от типовых и групповых к модульным технологиям.

3. Основы теории базирования при современном развитии производства следует актуализировать с учетом перехода от существующего описания из теоретической механики посредством положения трех координатных точек к новому описанию из теории машин и механизмов путем лишения предмета базирования степеней свободы (подвижности) в технической системе (конструкторской, технологической, измерительной).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Витязь, П. А.** «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
2. **Базров, Б. М.** Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. НАН Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384.
3. **Hanpan, R.** Computer Integrated Manufacturing: from concepts to realization / R. Hanpan. – Harlow: Addison Wesley, 1977. – 258 p.
4. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Под общ. ред. М. Л. Хейфеца, Б. П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.
5. CALS в авиастроении / А. Г. Братухин [и др.]; под ред. А. Г. Братухина. – Москва: Моск. авиац. ин-т, 2000. – 304 с.
6. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б. И. Черпаков [и др.]; под ред. Б. И. Черпакова. – Москва: ВИМИ, 1999. – 512 с.
7. **Базров, Б. М.** Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – Москва: Машиностроение, 2001. – 368 с.
8. **Базров, Б. М.** Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – Москва: Машиностроение, 2005. – 736 с.
9. **Колесов, И. М.** Основы технологии машиностроения / И. М. Колесов. – Москва: Высшая школа, 1999. – 591 с.
10. **Базров, Б. М.** Совершенствование понятийного аппарата теории базирования / Б. М. Базров // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 1 (103). – С. 30–33.
11. **Базров, Б. М.** Теория и практика базирования в машиностроении / Б. М. Базров // Вестн. машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 5–10.
12. **Базров, Б. М.** Практическое приложение теории базирования в машиностроении / Б. М. Базров // Вестн. машиностроения. – 2017. – № 5. – С. 6–11.

УДК 620.179.162 : 534.87

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Е. БАЗУЛИН, Д. С. ТИХОНОВ

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

Москва, Россия

UDC 620.179.162 : 534.87

EXPERIENCE OF APPLICATION OF AUTOMATED ULTRASONIC INSPECTION OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

A. E. BASULIN, D. S. TIKHONOV

Аннотация. Представлены основные особенности систем автоматизированного ультразвукового контроля серии АВГУР, разработанных и применяемых ООО «НПЦ «ЭХО» в атомной, нефтегазовой, авиационной отраслях, в том числе при предэксплуатационном и эксплуатационном контроле сварных швов.

Ключевые слова: АУЗК, ФР, трубопровод, аустенитный сварной шов.

Abstract. The report presents the main features of the automated ultrasonic testing systems of the AVGUR series, developed and used by ООО СПС ЕКНО in the nuclear, oil and gas industries, aviation industries, including pre-operational and operational control of welds.

Keywords: AUT, PA, pipeline, austenitic weld.

Введение. Представлены основные особенности систем автоматизированного контроля, разработанных и применяемых ООО «НПЦ «ЭХО» в атомной, нефтегазовой, авиационной отраслях, в том числе при предэксплуатационном и эксплуатационном контроле сварных швов.

Для проведения АУЗК сварных соединений трубопроводов и оборудования атомных электростанций и других объектов атомной отрасли толщиной от 8 до 300 мм применяются системы АВГУР-Т и АВГУР-АРТ, обеспечивающие автоматическое перемещение ультразвуковых преобразователей, визуализацию, полуавтоматическое определение параметров дефектов и выдачу заключения с дефектограммой. Применяются методы обработки ФР, ПСП, ЦФА, ЦФА-Х, ЦФА-У. Различные сканирующие устройства обеспечивают необходимые траектории сканирования.

Для проведения АУЗК сварных соединений тройников сварных с накладками, применяемых в ПАО «Газпром» с 2010 г., используется система АВГУР-Т, реализующая технологию ПСП-ЗД, за счет чего обеспечиваются необходимый уровень чувствительности и разрешающая способность, позволяющие разбраковывать поднакладочные сварные соединения по нормам для обычных кольцевых сварных соединений.

Для АУЗК и МУЗК сварных соединений магистральных, технологических и промысловых газопроводов применяется система АВГУР-ТФ со сканерами на магнитных колесах или на жестком треке. По результатам испытаний и

пусконаладочных работ на предприятии заказчика отмечена возможность проведения сканирования сварного шва трубопровода 1420×20 мм за 3...4 мин. На ряде примеров показана хорошая сходимость результатов радиографического контроля и АУЗК. Системы АВГУР-Т и АВГУР-ТФ поставляются в ООО «Газпром трансгаз Беларусь».

Все системы АВГУР построены на базе единого программного обеспечения АВГУР с функциями:

- настройки, калибровки ультразвуковых многоканальных дефектоскопов;
- создания электронных технологических карт контроля с определением зоны прозвучивания объекта контроля;
- хранения, анализа и систематизации результатов контроля в базе данных (на сервере ЭХО + хранится более 10 Тб данных, сохраняемых с 2002 г., проведен контроль более 10 000 сварных соединений).

Проведение аттестации системы АВГУР-ТФ при строительстве трубопровода Северный поток-2. При проведении контроля сварных соединений трубопроводов сухопутной части проекта Северный поток-2 в соответствии с проектной документацией и ГОСТ Р 54382–2011 необходимо было проведение автоматизированного ультразвукового контроля. Проводился контроль сварных соединений типоразмером от 168×10 до 1420×40 мм с применением технологий ФР и TOFD по схемам контроля для выявления поперечных дефектов. Для визуализации изображений поперечных дефектов применялся метод SAFT. Для допуска к работе проведены испытания и валидация методики и системы контроля с представителями заказчика и сертифицирующего органа в соответствии с DNV OS F101 (ГОСТ Р 54382–2011). Показана воспроизводимость результатов настройки чувствительности при положениях настроечного образца на 0, 3, 6, 9 часах. Сделаны следующие выводы:

- для ФР-каналов максимальная амплитуда изображения боковых отверстий диаметром 3 мм, попадающих в сектор контроля на прямом или однократно отраженном луче, отличалась не более ± 2 дБ от заданного стандартного уровня 80 % высоты экрана (рис. 1);
- попадающие в сектор контроля пазы выявлены на всех сканах ФР и имеют максимальную амплитуду выше опорного уровня на 80 %;
- для TOFD-каналов боковые отверстия и пазы выявлены и имеют глубину и длину в соответствии с их размерами на настроечном образце;
- для метода контроля на поперечные дефекты выявлены поперечные пазы, индикации от них имеют глубину в соответствии с толщиной настроечного образца, а максимальная амплитуда пазов отличается не более ± 2 дБ от уровня 80 % высоты экрана (рис. 2).

Разработка методики контроля угловых швов приварки бобышек. При проведении пусконаладки на одном из предприятий нефтегазопереработки выяснилось, что не были своевременно осуществлены работы по неразрушающему контролю сварных швов приварки бобышек (веллолетов).

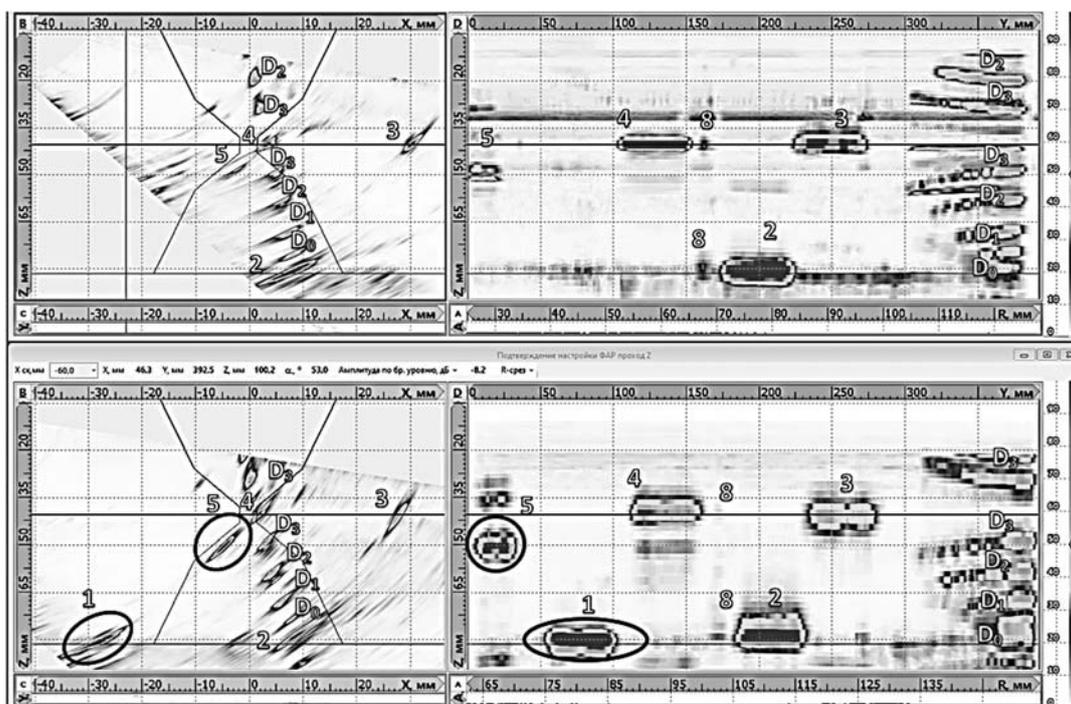


Рис. 1. Результаты сканирования настроечного образца толщиной 41 мм. Выполняется два прохода при сдвиге фазированной решётки относительно оси сварного шва

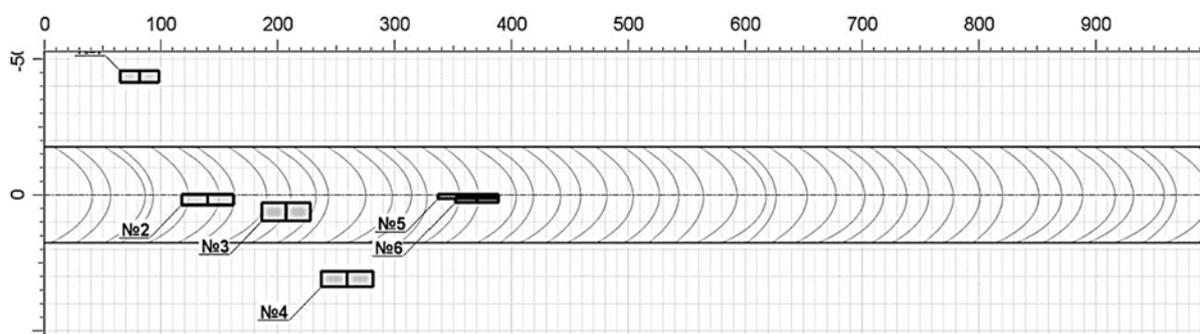


Рис. 2. Пример дефектограммы, выданной автоматически по результатам контроля настроечного образца

Потребовалось разработать и обосновать применение методики ультразвукового контроля. Представлены результаты разработки методики ультразвукового контроля угловых сварных швов приварки велдолета с наружным диаметром от 114 мм и более с толщиной от 10 до 55 мм к технологическим трубопроводам с наружным диаметром от 426 мм и более с толщиной стенки от 8 до 40 мм и результаты практического применения методики с использованием ручного дефектоскопа АВГУР-АРТ (на рис. 3 показана схема прозвучивания при двух положениях ФР по окружности относительно приваренного элемента). Особенность методики состоит в обязательной визуализации хода лучей при контроле по окружности приваренного элемента, в применении сложного настроечного образца и нескольких файлов настройки для каждого из секторов окружности. Таким образом, учтены изменения в геометрии «дна»

и кромки сплавления в зависимости от положения ФР. При проведении контроля были выявлены дефекты по границе сплавления с основным элементом. Дефекты были подтверждены выборкой и отремонтированы.

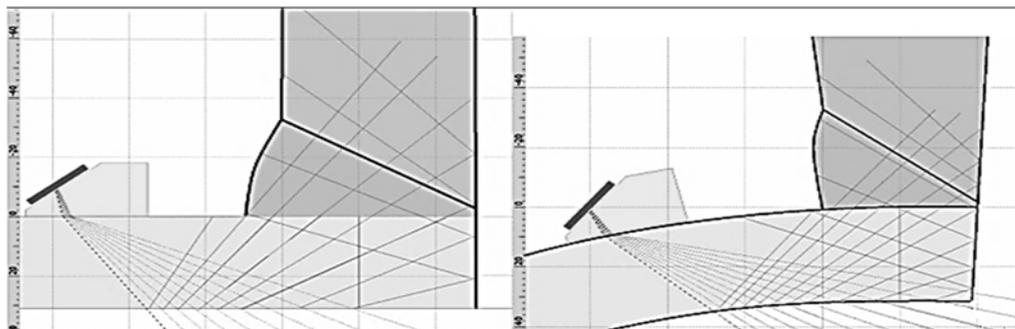


Рис. 3. Схемы прозвучивания углового шва приварки велдолета при вводе ультразвука со стороны основного элемента при двух положениях фазированной решетки

Проведение ультразвукового контроля сварного шва из аустенитных материалов толщиной 300 мм. При аттестации технологии сварки и изготовлении оборудования для испытания элементов вакуумной камеры ИТЭР поставлена задача проведения АУЗК толстостенных (до 300 мм) сварных соединений из нержавеющей материалов. Для решения задачи применена технология прореженных антенных решеток (ПРАР), которая предполагает использование небольшого числа (6–8) пьезоэлементов, расположенных в одном корпусе, сканирования с мелким (голографическим) шагом и последующей когерентной обработкой полученного при сканировании набора А-сканов [1]. В данном случае применялась ПРАР 6L1.8N30N45 с шестью элементами для ввода продольной волны с рабочей частотой 1,8 МГц. На рис. 4 показаны вид настроечного образца с БЦО по границам сплавления и схема контроля с применением ПРАР. ПРАР перемещался 597 раз с шагом 0,486 мм вдоль оси x и 48 раз с шагом 1,5 мм по оси y . Измерялись эхосигналы при излучении первым элементом ПРАР и приёмом шестью элементами (первый выстрел) и излучении шестым элементом ПРАР и приёмом шестью элементами (шестой выстрел).

Для перемещения ПРАР по объекту контроля использовался двухкоординатный прецизионный сканер СК426С с набором направляющих треков в соответствии со сложной геометрией объекта контроля [2]. Для сварных швов толщиной от 8 до 60 мм применялся более традиционный подход с использованием ФР на частоту 5 МГц с вводом поперечной и продольной волны. На рис. 5 показан пример восстановления изображения БЦО на оси сварного шва толщиной 300 мм, распределенных по глубине залегания. Контроль слева и справа от сварного шва. Видно, что отверстия выявляются с достаточным для анализа отношением сигнал/шум. Также можно отметить, как возрастает уровень структурных шумов при переходе через границу разделки. Разработанная методика прошла валидацию и применялась при контроле конечного изделия. На этапе аттестации сварщиков были выявлены дефекты типа непроваров в корне X-образного сварного соединения.

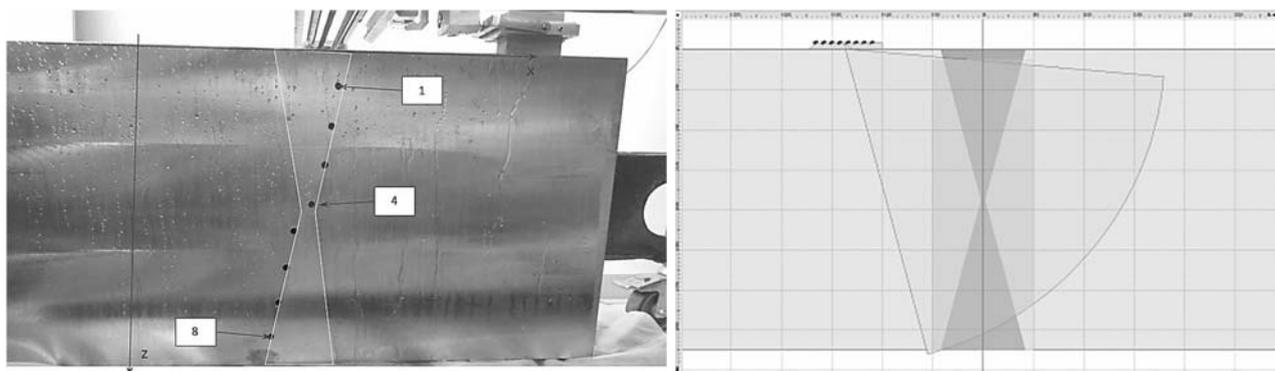


Рис. 4. Вид объекта контроля толщиной 300 мм (слева) и схема контроля с применением ПРАР

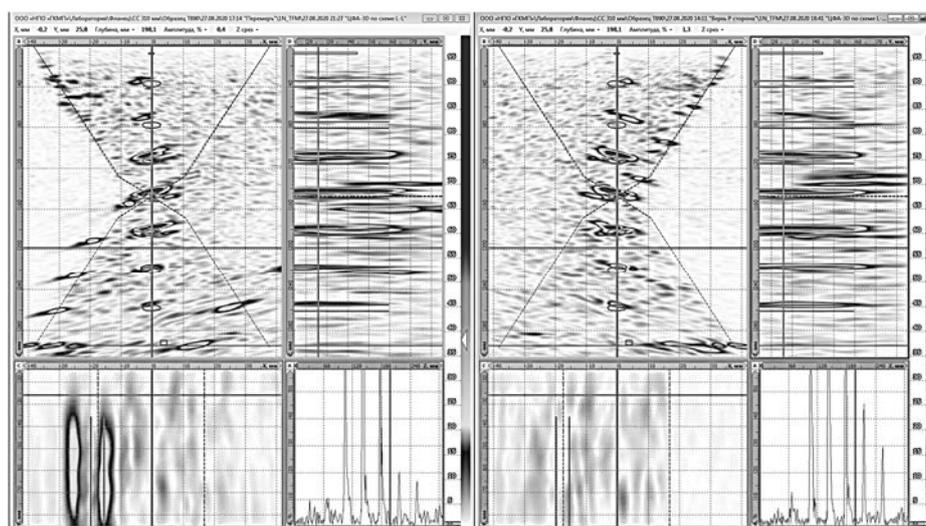


Рис. 5. Выявление БЦО на оси сварного шва в настроечном образце при контроле с двух сторон от сварного шва

Выводы. Современные российские решения в области автоматизированного и механизированного ультразвукового контроля с применением технологий ФАР, ЦФА, ПРАР, TOFD позволяют решать задачи выявления и определения параметров дефектов в сварных швах и основном материале, в том числе из аустенитных материалов, решать задачи контроля объектов со сложной геометрией (патрубки, внутренние проточки), а также задачи высокопроизводительного контроля магистральных трубопроводов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базулин, Е. Г. Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решёток / Е. Г. Базулин, С. А. Коколев // Дефектоскопия. – 2013. – № 5. – С. 45–58.
2. Ультразвуковой контроль сварных соединений из нержавеющей стали стенда испытания порт-плагов ИТЭР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=MxC6irac6LY>. – Дата доступа: 21.07.2022.

E-mail: android@echoplus.ru.

УДК 621.791

ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И РЕГИСТРАЦИИ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

С. В. БОЛОТОВ, К. В. ЗАХАРЧЕНКОВ, Н. К. БОБКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 621.791

TECHNOLOGY OF REMOTE CONTROL AND REGISTRATION OF WELDING PROCESSES

S. V. BOLOTOV, K. V. ZAKHARCHENKOV, N. K. BOBKOV

Аннотация. Разработана технология, позволяющая дистанционно контролировать ход процесса дуговой сварки, получить документальное подтверждение качества сварочных работ. Технология реализована на основе регистраторов сварочных процессов и программного обеспечения в виде клиентского приложения, серверной части и базы данных.

Ключевые слова: сварочные процессы, контроль, регистратор, автоматизированная система, паспорт сварного шва.

Abstract. A technology has been developed that allows you to remotely control the progress of the arc welding process, to obtain documentary evidence of the quality of welding work. The technology is implemented on the basis of welding process recorders and software in the form of a client application, a server part and a database.

Keywords: welding processes, control, recorder, automated system, weld certificate.

Актуальной для современного производства является задача обеспечения качества ответственных сварных конструкций. Подтвердить качество сварки возможно при выполнении следующих условий:

– наличие аттестованной (квалифицированной) технологии сварки по СТБ ISO 15614-1...13–2009;

– аттестованный сварщик в соответствии с СТБ EN 287-1–2009 (право выполнения сварочных работ на опасных производственных объектах, потенциально опасных объектах, а также технических устройствах, на них эксплуатируемых, поднадзорных Госпромнадзору), ПНАЭ Г-7-003–87 и Нормами и правилами по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Организация и выполнение сварочных работ на объектах использования атомной энергии», СТБ 2350–2013 (право осуществлять сварку арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций, металлических конструкций и трубопроводов в строительстве);

– прошедшее процедуру аттестации или проверку на соответствие паспортным данным по ГОСТ Р МЭК 60974-1–2012 (ГОСТ IEC 60974-1–2018) сварочное оборудование;

– аттестованные или сертифицированные сварочные материалы;

– строгое соблюдение установленных инструкцией на технологический процесс сварки параметров режима.

Аттестация технологических процессов сварки, сварщиков, сварочного оборудования и материалов производится с участием специализированной организации, имеющей соответствующие сертификаты и разрешения, например, Центром сертификации и испытаний Белорусско-Российского университета.

Для контроля параметров режима сварки применяют автоматизированные системы на основе регистраторов сварочных процессов. Так, известны программно-аппаратные комплексы европейских производителей сварочного оборудования Kemppi WeldEye, Fronius WeldCube, ESAB WELDQAS, Ewm Xnet, а также российских компаний НПФ «ИТС», EVOSPARK [1]. Данные системы преимущественно ориентированы под конкретного производителя сварочного оборудования, позволяют лишь регистрировать и сохранять в память данные о параметрах режима сварки, имеют закрытый код и не позволяют гибко перестроить систему под конкретное сварочное производство организации.

Была разработана принципиально новая технология, позволяющая осуществлять дистанционный контроль качества сварки на объектах повышенной опасности.

Технология обеспечивает:

- идентификацию и подтверждение квалификации сварщика;
- идентификацию и проверку требуемых характеристик сварочного оборудования;
- получение с сервера заданий на сварку в соответствии с инструкциями на технологический процесс сварки;
- регистрацию, сохранение на сервере параметров режима сварки и сообщение об их выходе за установленные технологической инструкцией границы;
- отображение состояния сварочного оборудования на карте;
- учёт причин простоя сварочного оборудования;
- оценку качества сварочных работ;
- формирование отчетов о работе сварщиков и сварочного оборудования;
- формирование паспорта сварного шва.

Паспорт сварного шва является итоговым документом, подтверждающим качество сварки.

Научная новизна и значимость полученных результатов заключается в разработке автоматизированной системы контроля сварочных работ, позволяющей анализировать процессы плавления и переноса электродного металла, оценивать стабильность и качество процесса сварки, выставлять комплексную оценку, характеризующую качество сварочных работ [1, 2].

Регистратор сварочных процессов РСП-БРУ-01 (рис. 1) включает три основных блока [3, 4].

1. Основной блок. Располагается в месте установки сварочного источника питания. На лицевой панели основного блока расположены: дисплей, клавиатура; на боковой панели – зона для считывания удостоверений с RFID-метками;

на задней панели – разъём питания, кнопка включения/отключения питания, разъёмы подключения датчиков, разъём USB для подключения внешнего носителя информации, антенна GSM-модуля и антенна GPS-модуля. Данный блок обеспечивает идентификацию сварщиков с использованием RFID-меток, получение из программной части системы сменных заданий, определенных мастером для каждого сварщика, выбор сварщиком заданий для исполнения, регистрацию и усреднение значений параметров сварки, полученных с блока датчиков, с последующей передачей через GSM-связь или WI-FI в программную часть системы.



Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы

2. Блок датчиков. Располагается рядом с выходными зажимами сварочной цепи источника питания. Блок датчиков выполнен в защищённом корпусе с отверстием под сварочный кабель для бесконтактного измерения сварочного

тока, разъёмами для подключения к сварочным клеммам источника питания для измерения напряжения на дуге и разъёмом для соединения с основным блоком регистратора. В качестве датчиков использованы компенсационные датчики тока и напряжения, работающие на эффекте Холла, фирмы LEM (Швейцария): LF 505-S, LV 25-P/SP. Блок датчиков обеспечивает регистрацию сварочного тока и напряжения на дуге с точностью $\pm 1,5\%$ и передачу сигнала в основной блок регистратора. В результате проведенных в Белорусско-Российском университете экспериментов установлено, что для исследования процессов дуговой сварки плавящимся электродом оптимальной частотой опроса при измерениях регистратором сварочного тока и напряжения на дуге является 10...20 кГц. При этом сохранение данных о параметрах режима сварки (усреднение данных) следует проводить с частотой 10 Гц [5].

3. Пульт сварщика. Пульт сварщика располагается в месте проведения сварочных работ и связан по протоколу RS-485 с основным блоком. На передней панели пульта расположены ЖКИ, кнопки, разъём для подключения термопары. Пульт сварщика предназначен для дистанционного переключения сварочных швов (слоёв), звукового оповещения сварщика о выходе параметров режима за установленные пределы, контроля температуры предварительного подогрева.

Программная часть автоматизированной системы (см. рис. 1) включает следующие основные модули:

1) автоматизированное рабочее место (АРМ) мастера. Мастер распределяет задания сварщикам на выполнение каждого шва каждого изделия, узла, детали. Критериями эффективности распределения заданий между сварщиками является минимизация количества перемещений и переключения режимов сварки каждым сварщиком. В случае выхода в процессе сварки шва параметров сварочного процесса за пределы допустимых значений более 1 с подряд в клиентском приложении мастера соответствующее задание (изделие, узел, деталь, шов) подсвечивается цветовым индикатором. Если сварочное оборудование простаивает более 5 мин подряд после завершения выполнения очередного задания сварщиком, мастер вносит причину простоя оборудования. По результатам работы системы мастеру выводятся результаты комплексной оценки качества сварочных работ;

2) АРМ сварщика. Перед началом работы сварщик идентифицирует себя на регистраторе с помощью удостоверения RFID-меткой. После идентификации сварщик выбирает первое в списке задание, после чего на регистраторе и пульте сварщика (опционально) высвечиваются допустимые параметры сварочного процесса. Сварщик выставляет на сварочном аппарате рекомендуемые параметры режима сварки и подтверждает начало сварки прохода. При выходе параметров режима сварки за рекомендуемые границы регистратор и/или пульт сварщика (опционально) производит звуковую и световую индикацию (с помощью зуммера), на дисплее регистратора отображается запись: выход тока (напряжения) за верхнюю (нижнюю) границу. При длительном нарушении параметров режима сварки (более 10 с) блокируется работа сварочного аппарата. При простое оборудования более 5 мин сварщик вводит причину простоя. После завершения сварки шва сварщик подтверждает завершение процесса сварки на

регистраторе или с пульта (опционально), после чего сварщик переходит к выполнению следующего задания из списка. В случае пропуска задания сварщик ставит в известность мастера о причине, по которой выполнение задания невозможно;

3) АРМ контролера. По мере завершения выполнения заданий сварщиками контролеры оценивают качество сварных швов, подлежащих контролю. При выявлении брака и/или дефектов сварных швов контролеры фиксируют факт брака или выявленные дефекты сварного соединения. В процессе выполнения сварочных работ контролер просматривает паспорта сварных швов, уделяя особое внимание швам, подсвеченным цветовой индикацией (по которым были зафиксированы выходы параметров сварочных процессов за пределы допустимых значений). По результатам работы системы контролерам выводятся отчеты о выпуске продукции и браке;

4) АРМ руководителей организации. Руководителям организации в реальном времени с задержкой на время передачи данных на сервер выводятся информационно-аналитические отчеты о выпуске продукции, браке, простоях оборудования, паспорта сварных швов (рис. 2).

Показания сварочного тока по слою №1, А



	Значение			Обеспечение допуска
	минимальное	максимальное	среднее	
Сварочный ток, А	31.8	101.0	83.3	нет
Напряжение на дуге, В	24.8	46.6	27.6	да
Оценка			7	

Рис. 2. Фрагмент паспорта сварного шва

Технология дистанционного контроля и регистрации сварочных процессов состоит из следующих этапов.

1. Ввод с помощью клиентского Web-приложения сменных заданий руководителем сварочных работ (мастером), включающих: наименование изделия, узла, детали; цех, участок, рабочее место, маркировку сварных соединений (швов); прошедший аттестацию технологический процесс сварки с допусками на контролируемые параметры режима; ФИО сварщика, имеющего соответствующую область распространения квалификации; сварочное оборудование с требуемыми техническими характеристиками; основные и сварочные материалы с указанием номера партии и акта входного контроля.

2. Радиочастотная идентификация (с помощью удостоверения или брелока с RFID-меткой) сварщика, сварочного оборудования на регистраторе сварочных процессов. Считывание сменных заданий с сервера для конкретного сварщика и сварочного оборудования с использованием канала GSM или WI-FI. Выбор сменного задания к выполнению.

3. В случае невозможности выполнения сварочных работ выбор из базы данных сварщиком или мастером причины простоя оборудования.

4. Запуск сварщиком на регистраторе процесса контроля сварочных работ.

5. Регистрация термопарой, установленной на свариваемом изделии, температуры предварительного нагрева области сварки. Сравнение с допуском на температуру в соответствии с технологической инструкцией. Переход к следующему этапу при обеспечении допуска.

6. Регистрация и передача данных с блока датчиков (сварочный ток, напряжение на дуге) на регистратор и пульт сварщика. Сравнение регистрируемых параметров с допусками в соответствии с технологической инструкцией. Выдача звукового сигнала в случае выхода параметров режима сварки за допустимые значения. Блокировка работы сварочного аппарата в случае длительного (более 10 с) нарушения параметров режима сварки.

7. Передача данных с регистратора на сервер с использованием канала GSM или WI-FI.

8. Анализ данных на сервере. Выставление комплексной оценки после каждого прохода (корневой, заполняющий, облицовочный) сварного шва.

9. Формирование паспорта каждого сварного шва.

10. Визуальный и выборочный неразрушающий контроль (рентген, УЗК) сварных швов. Ввод контролером результатов контроля в автоматизированную систему.

11. Формирование руководителями отчётов о выполненных операциях, о работе сварщика, о работе и простоях сварочного оборудования. Принятие корректирующих действий.

Принципиальной новизной предлагаемой технологии является использование информационно-аналитической модели, позволяющей на основе регист-

рации и анализа параметров сварочных процессов выставить комплексную оценку, характеризующую качество сварного шва, работу сварщика и сварочного оборудования [1].

Отличительными особенностями предложенной технологии является объективная оценка качества сварочных работ; возможность постоянного контроля работы сварщиков и сварочного оборудования в реальном времени; документальное подтверждение качества сварки каждого соединения.

Технология прошла опытно-промышленные испытания при сварке магистральных трубопроводов в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», внедрена в сварочном производстве ЗАО «Машагропром» (г. Минск), ООО «ИНВЕСТАП-МАИНД» (г. Минск). Реализованная технология значительно превосходит имеющиеся аналоги (регистраторы сварочных процессов) по информативности, позволяет получить документальное подтверждение качества сварки.

Область применения технологии: сварочное производство в машиностроении, автомобилестроении, приборостроении, космической промышленности, атомной энергетике, нефтегазовой отрасли. Дистанционный контроль сварочных процессов позволяет значительно повысить качество сварных соединений, сократить затраты на исправление брака.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция создания информационных систем автоматического контроля работы сварщиков / С. В. Болотов [и др.] // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. ИММВ-2022, Коломна, 16–19 мая 2022 г.: в 2 т. – Москва: РАИИ, 2022. – Т. 2. – С. 257–268.
2. Intelligent welding control system / S. V. Bolotov [et al.] // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – № 2965. – P. 260–267.
3. **Болотов, С. В.** Регистратор параметров сварочных процессов РСП-БРУ-01 / С. В. Болотов // Современные проблемы машиностроения: сб. тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: ТПУ, 2021. – С. 197–198.
4. Регистратор параметров сварочных процессов: заявка ВУ 20210320 / С. В. Болотов, В. Н. Почуйко, Н. К. Бобков. – Оpubл. 27.01.2022.
5. Investigation of the Criteria for Evaluating Electrode Metal Transfer in Short Circuit Gas-Shielded Arc Welding [Electronic resource] / S. V. Bolotov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – № 1118. – P. 0120003. – Mode of access: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1118/1/012003/pdf>.

E-mail: s.v.bolotov@mail.ru, zaharchenkovkv@mail.ru.

УДК 519.65+534.1+004.3+004.42+004.9

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ И АВТОМАТИКИ ЗАЩИТЫ

П. Ю. БРАНЦЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь

UDC 519.65+534.1+004.3+004.42+004.9

DECISION NETWORK FOR SYSTEMS VIBRATION DIAGNOSIS AND PROTECTION AUTOMATION

P. J. BRANCEVICH

Аннотация. По мере получения и накопления больших объемов данных все более актуальной становится потребность в автоматизации их обработки и принятия решений для самых разнообразных задач. В промышленности и энергетике одной из них является техническая диагностика. В настоящее время в промышленной эксплуатации на предприятиях энергетики находятся десятки измерительно-вычислительных компьютерных комплексов серии «Лукомль-2001» непрерывного вибрационного контроля и мониторинга сложных агрегатов роторного типа, которые формируют временные тренды для 14 вибрационных параметров с временным шагом 1...8 с по каждой точке контроля на эксплуатируемом объекте. Предлагается функционал типового модуля принятия решений, входными данными которого являются параметры и характеристики вибраций наблюдаемого объекта. Типовые модули конфигурируются в сеть принятия решения в соответствии с постановкой решаемой задачи вибродиагностики или автоматике защиты.

Ключевые слова: параметр, характеристика, решение, вибрация, сигнал, сеть.

Abstract. As large amounts of data are received and accumulated, the need to automate their processing and decision-making for a wide variety of tasks becomes more and more urgent. In industry and energy, one of them is technical diagnostics. Currently, dozens of measuring and computing computer systems of the «Lukoml-2001» series for continuous vibration control and monitoring of complex rotary-type units are in commercial operation at energy enterprises, which form time trends for 14 vibration parameters with a time step of 1...8 s for each point control at the operating facility. The functionality of a typical decision-making module is proposed, the input data of which are the parameters and characteristics of the vibrations of the observed object. Standard modules are configured into a decision making network in accordance with the statement of the problem being solved of vibration diagnostics or automatic protection.

Keywords: parameter, characteristic, solution, vibration, signal, network.

Введение. В производственных процессах значительную часть от эксплуатационных затрат составляют расходы, направляемые на обеспечение работоспособности основного оборудования. Считается, что наиболее изнашиваемым является оборудование с вращательным движением (турбины, генераторы, двигатели, редукторы, насосы, компрессоры, вентиляторы). Снизить затраты на его эксплуатацию можно путем внедрения современных систем технического обслуживания, которые базируются на использовании технологий мониторинга, оценки состояния, диагностики, прогнозирования

развития дефектов, которые с точки зрения их организации и функционирования являются интеллектуальными системами [1].

Состояние производственного оборудования может характеризоваться многими параметрами основных и вторичных процессов, развивающихся при его работе. Для контроля целесообразно выбирать те, которые достаточно хорошо отражают функциональное состояние объектов и не требуют слишком больших затрат на их измерение. В этом плане, для механизмов с вращательным движением, такими являются параметры вибрации [1, 2]. На основе анализа вибрационного состояния группы однотипных механизмов при их функционировании на различных режимах, в различном техническом состоянии и на протяжении длительного времени могут быть обоснованы и сформулированы диагностические признаки для локализации мест и причин повышения вибрации. Это создает условия для построения автоматизированных интеллектуальных систем оценки технического состояния и диагностики, значительно облегчающих работу инженерно-технического персонала [3].

Медицинская диагностика, как набор правил, методов и решений, которые позволяют прийти к заключению о наличии или вероятности наличия у человека того или иного заболевания, имеет много общего с технической диагностикой [4]. Открытие новых и совершенствование уже существующих методов оценки состояния человека является важным направлением медицинских исследований. В связи с этим формализация систем принятия решений, на основе получаемых данных, является весьма актуальной, причем все более доступной для создания, по крайней мере для многих частных случаев, за счет растущей вычислительной и информационной мощности применяемых технических средств.

Модель базового элемента системы принятия решений (БЭ СПР). Состояние наблюдаемого технического или природного объекта описывается параметрами и характеристиками.

Параметр – свойство (показатель) объекта или системы, которое можно измерить. Результатом измерения параметра системы является число или величина, а саму систему можно рассматривать как множество параметров, которое требуется измерить для моделирования или оценки ее поведения. Иногда параметрами называют также величины, очень медленно изменяющиеся по сравнению с другими величинами (переменными). Примерами параметров вибрации являются среднее квадратическое значение (СКЗ) виброускорения (виброскорости), размах колебаний, амплитуда колебаний на определенной частоте, вычисляемые в процессе обработки вибрационного сигнала, формируемого первичными преобразователями (датчиками), преобразующими механические колебания в электрический сигнал, установленными на подшипниковой опоре или корпусе механизма.

Характеристика – это совокупность отличительных свойств кого-либо или чего-либо. Характеристика в технике есть графическое или табличное выраже-

ние зависимости одного параметра от другого, а также функция, выражающая или описывающая эту зависимость. Например, характеристикой объекта является амплитудный спектр вибрационного сигнала, возбуждаемого на корпусе подшипниковой опоры, или отрезок временной реализации вибрационного сигнала.

Чтобы выполнять оценку состояния наблюдаемого объекта, требуется некая система принятия решений или поддержки принятия решений. Предлагается следующая модель базового решающего элемента системы принятия решений по оценке состояния наблюдаемого объекта или выработке рекомендаций по воздействию на данный объект.

Входными данными базового элемента являются:

x_i – значение параметра i , $i = 1 \dots N$;

$\omega_j(y_{j,1}, \dots, y_{j,k})$ – характеристика j при дискретных значениях аргумента y_j , $j = 1 \dots M$;

$\omega_j(y_j(t))$ – характеристика j при непрерывном значении аргумента y_j , $j = 1 \dots M$.

По отношению к входным исходным параметрам и характеристикам применяются функции первичной обработки: $f_l(x_i)$, где $l = 1 \dots B$; $\phi_m(\omega_j)$, где $m = 1 \dots C$.

Причем разные функции f_l могут применяться по отношению к одному и тому же параметру x_i , а различные функции ϕ_m – к одному и тому же значению характеристики ω_j . Могут быть и комплексные многопараметрические-многохарактеристические функции: $\Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p)$, где $n = 1 \dots D$; $i, j, k \in 1 \dots N$; $l, m, p \in 1 \dots M$.

По отношению к набору функций: $f_l(x_i)$, $\phi_m(\omega_j)$, $\Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p)$ применяются обобщающие функции:

$$y_k = \Psi_k \left[\begin{array}{l} f_l(x_i), l = 1 \dots B; \phi_m(\omega_j), m = 1 \dots C; \\ \Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p), n = 1 \dots D; \end{array} \right]; k = 1 \dots L.$$

И уже по отношению к y_k применяются разнообразные решающие функции: $S_\eta(y_k)$, $\eta = 1 \dots P$.

Результат функции $S_\eta(y_k)$ определяет одно из возможных состояний анализируемого объекта, тип самого объекта, принимаемое решение. На рис. 1 данная модель представлена в графическом виде.

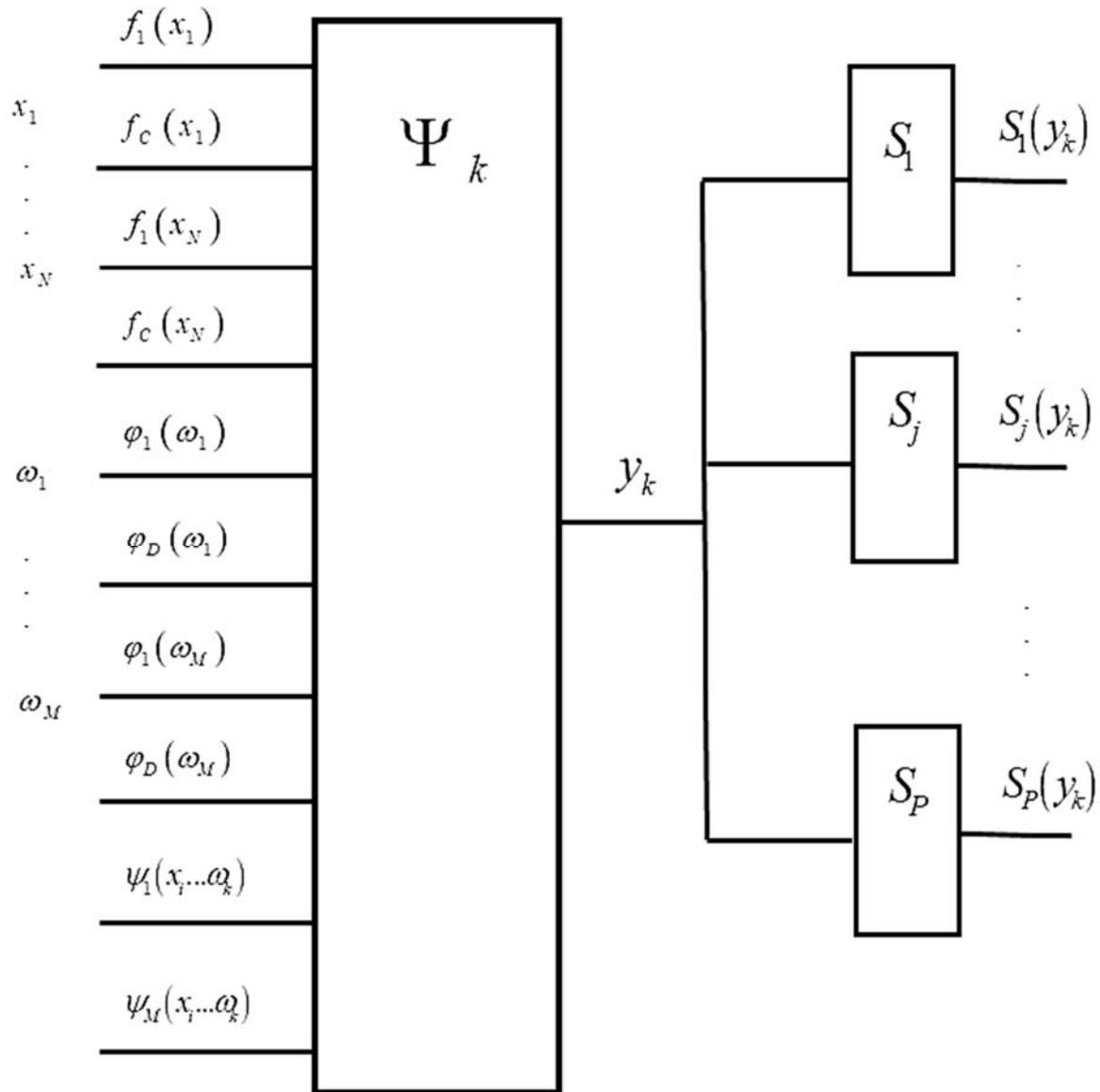


Рис. 1. Модель базового элемента принятия решений по оценке состояния наблюдаемого объекта

В простейшем случае параметры предлагаемой модели принятия решений будут иметь следующий вид:

$$f_l(x_i) = a_l x_i; \quad \varphi_m(\omega_j) = b_m \omega_j,$$

где $l = 1 \dots B$; $m = 1 \dots C$; a_l, b_m – действительные числа;

$$\Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p) = c_n \left(\sum_{i=1}^N r_i x_i + \sum_{j=1}^N s_j \omega_j \right),$$

где $n = 1 \dots D$; $i, j, k \in 1 \dots N$; $l, m, p \in 1 \dots M$; r_i, s_j – действительные числа.

$$y_k = \sum_{l=1}^B u_{l,k} f_l(x_i) + \sum_{m=1}^C v_{m,k} \Phi_m(\omega_j) + \\ + \sum_{n=1}^D w_{n,k} \Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p),$$

где $k = 1 \dots L$; $u_{l,k}, v_{m,k}, w_{n,k}$ – действительные числа.

$$S_\eta(y_k) = \rho_\eta y_k,$$

где $\eta = 1 \dots P$; ρ_η – действительные числа.

Применение БЭ СПР в автоматике защитного отключения турбоагрегата по параметрам вибрации. Наиболее важной задачей современных систем вибрационного контроля и диагностики является предотвращение аварийного повреждения защищаемого объекта при внезапном возникновении неисправностей или механических повреждений в его узлах или при существенном отклонении каких-либо технологических параметров от номинальных. Однако факт возникновения ситуации, требующей остановки технического объекта, во многих случаях имеет неоднозначное «отображение» в параметры вибрации. Стандартизованные критерии защиты [5] отражают наиболее общие взаимосвязи, полученные на основе длительного опыта эксплуатации и исследования механизмов с вращательным движением, и далеко не всегда в полной мере могут удовлетворить эксплуатирующий и управляющий персонал.

Системы вибрационного контроля и защиты, построенные на базе компьютерной техники, позволяют реализовать разнообразные и сложные алгоритмы защиты, ориентированные на конкретные типы дефектов и аварийных ситуаций. Это, в свою очередь, позволяет избежать необоснованных («ложная тревога») срабатываний защитного отключения и не допустить «пропуска дефекта» [6, 7]. Реализован и прошел апробацию на ряде турбоагрегатов алгоритм защитного отключения по вибрации, в котором учитывается несколько факторов.

1. Фактор низкочастотной составляющей вибрации.

Под низкочастотной вибрацией (НЧВ) понимается среднее квадратическое значение виброскорости (СКЗ) в зоне частоты, равной половине оборотной. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если для любой подшипниковой опоры турбоагрегата возникла следующая ситуация: СКЗ виброскорости НЧВ, измеренное для вертикального направления и для поперечно-горизонтального направления любой подшипниковой опоры, на протя-

жении 4...6 с превышает v , мм/с, и при этом хотя бы для одного из этих направлений оно на протяжении этого же времени превышает $3v$, мм/с. Уровень v определяется типом и рабочими частотами механизма.

2. Фактор оборотной составляющей вибрации.

Под оборотной составляющей вибрации понимается СКЗ виброскорости спектральной составляющей с частотой, равной частоте вращения вала (ротора) агрегата.

2.1. Величина СКЗ оборотной составляющей.

Для каждой подшипниковой опоры и каждого из направлений измерения вибрации устанавливается значение СКЗ виброскорости оборотной составляющей, соответствующее аварийному уровню, который выбирается с учетом конструктивных, функциональных и эксплуатационных особенностей контролируемого механизма. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если в четырех или более точках контроля СКЗ виброскорости оборотной составляющей превысило заданный, для соответствующей точки, аварийный уровень.

2.2. Вектор приращения оборотной составляющей.

Для каждой подшипниковой опоры и каждого из направлений измерения вибрации устанавливается значение вектора приращения оборотной составляющей, соответствующее аварийному уровню. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если в четырех или более точках измерений вектор приращения оборотной составляющей превысил заданный, для соответствующей точки измерений, аварийный уровень.

3. Фактор высокочастотной составляющей вибрации.

Под высокочастотной составляющей вибрации (ВЧВ) понимается СКЗ виброскорости в частотной полосе, нижняя граница которой равна двойной оборотной частоте, а верхняя – верхней границе частотного диапазона, в котором производится вибрационный контроль наблюдаемого механизма. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если для любых двух направлений измерения вибрации для любой подшипниковой опоры высокочастотная вибрация превысила значение аварийного уровня, установленного для данного объекта, в течение 3...6 с.

Сигнал на защитное отключение контролируемого механизма вырабатывается в том случае, если он выработан по одному из указанных критериев или по нескольким критериям одновременно.

Для реализации данной системы принятия решения о защитном отключении в качестве входных данных применяется характеристика:

$TI_j(x_0, \dots, x_{N-1})$, $j = 1 \dots M$ – временная реализация вибрационного сигнала;

M – число точек контроля для наблюдаемого турбоагрегата. Для каждой подшипниковой опоры контроль вибрации осуществляется в трёх точ-

ках-направлениях: вертикальном, поперечно-горизонтальном, осевом;

τ – дискретное время, определяющее периодичность получения исходных вибрационных сигналов.

Функция $\varphi_{1,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления СКЗ оборотной составляющей вибрации $A_{CCV,j}$.

Функция $\varphi_{2,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления фазы оборотной составляющей вибрации $\Phi_{CCV,j}$.

Функция $\varphi_{3,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления СКЗ НЧВ.

Функция $\varphi_{4,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления СКЗ ВЧВ.

Функция $f_{1,j,\Delta}(A_{CCV,j}, \Phi_{CCV,j}, \tau_{\Delta-1}, \tau_\Delta)$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления вектора приращения оборотной составляющей.

Обобщающие функции первого уровня имеют вид:

$$y_{1,\Delta} = \Psi_{1,1,\Delta} [\varphi_{3,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots];$$

$$y_{2,\Delta} = \Psi_{1,2,\Delta} [\varphi_{2,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots];$$

$$y_{3,\Delta} = \Psi_{1,3,\Delta} [f_{1,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots];$$

$$y_{4,\Delta} = \Psi_{1,4,\Delta} [\varphi_{4,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots].$$

Результатом каждой из обобщающих функций первого уровня $\Psi_{1,k,\Delta} ()$, $k = 1 \dots 4$ является $y_{k,\Delta}$, которое принимает два значения: ноль или единица. $y_{k,\Delta}$ являются входными параметрами $x_{k,\Delta}$ для обобщающей функции второго уровня:

$$z_\Delta = \Psi_{2,\Delta} (x_{1,\Delta} = y_{1,\Delta}, x_{2,\Delta} = y_{2,\Delta}, x_{3,\Delta} = y_{3,\Delta}, x_{4,\Delta} = y_{4,\Delta}).$$

Результат обобщающей функции второго уровня z_Δ . Значение $z_\Delta = 1$ соответствует решению о срабатывании защитного отключения. Значение $z_\Delta = 0$ соответствует нормальному режиму эксплуатации контролируемого объекта.

По сравнению с нейронной сетью преимущество данного подхода заключается в возможности наблюдения в течение некоторого времени, определяемого требованиями технологических процессов и потребителями, за изменением параметров исследуемого объекта и только после этого принимается соответствующее решение.

Заключение. Предложенная модель базового элемента системы принятия решений позволяет конфигурировать различные структуры, предназначенные для оценки состояния сложных технических и природных объектов. Представлен пример реализации системы принятия решений по оценке состояния многоопорного энергетического агрегата, как комбинации базовых решающих модулей, которая введена в промышленную эксплуатацию [8, 9]. Рассмотренный подход может быть использован при моделировании разнообразных систем, принимающих решения, в том числе и органических объектов, управляющим устройством которых является многоуровневая, многослойная, объемная нейронная сеть, типовой элемент которой имеет вид предложенного базового элемента принятия решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник. Кн. 2: Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. **Bently, D. E.** Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics / D. E. Bently, C. N. Hatch, V. Grissom. – Canada: Bently pressurized bearing co., 2002. – 726 p.
3. **Ширман, А. Р.** Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – Москва: Наука, 1996. – 276 с.
4. **Барков, А. В.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2000. – 169 с.
5. **ГОСТ ИСО 10816-1-97.** Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1: Общие требования.
6. **Brancevich, P.** Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20-th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, 7–11 July 2013. – USA: Curran Associates, Inc., 2013. – P. 612–619.
7. **Бранцевич, П. Ю.** Организация и алгоритмы системы вибрационного контроля и оценки технического состояния турбоагрегатов по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Г. Г. Соболев // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докл. – Москва: ВТИ, 2003. – С. 25–29.
8. **Бранцевич, П. Ю.** Большие данные в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 28–41.
9. **Brancevich, P.** Detection of vibration disturbances during the analysis of long realisations of vibration signals / P. Brancevich, Y. Li // 25-th International Congress on Sound and Vibration. Hiroshima, 8–12 July 2018. – USA: Curran Associates, Inc., 2018. – P. 2736–2743.

УДК 620.179.142.6

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО НАКОНЕЧНИКА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ ИМИТАТОРОВ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

О. В. БУЛАТОВ, В. И. ШАРАНДО

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.142.6

INFLUENCE OF THE MEASURING TIP SHAPE ON THE PRECISION OF THICKNESS MEASUREMENT OF THE IMITATORS OF NON-FERROMAGNETIC COATINGS

O. V. BULATOV, V. I. SHARANDO

Аннотация. Исследовано влияние формы измерительного наконечника на точность измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий. Показано, что в том случае, когда имитатор изготовлен из мягкого материала (фторопласт), относительная погрешность измерений толщины имитатора может по модулю превышать 50 %. В случае высокотвердого материала (керамика или ее аналог) погрешность измерений практически не зависит от формы наконечника. Приведены рекомендации по выбору материалов имитаторов.

Ключевые слова: средство измерений, измерительный наконечник, форма наконечника, покрытие, толщина, погрешность измерений.

Abstract. The influence of the shape of the measuring tip on the measurement accuracy of the thickness of imitators of non-ferromagnetic coatings is investigated. It is shown that in the case when an imitator is made from soft material (e.g. fluoroplast), the measurement relative error of the imitator thickness may exceed in absolute value 50 %. In the case of very hard material (ceramic or its analog) the measurement error is practically independent on the tip shape. Recommendations on the choice of materials for the imitators are given.

Keywords: measuring gauge, measuring tip, tip shape, coating, thickness, measurement error.

ИПФ НАН Беларуси с 2004 г. серийно выпускает толщиномеры покрытий магнитные цифровые МТЦ-3, которые в настоящее время внесены в Государственный реестр средств измерений и стандартных образцов Республики Беларусь под регистрационным № РБ 03 20 8604 22, что подтверждается сертификатом № 14878. Приборы данного типа относятся к одной из категорий средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии (см. п. 15.4 приложения к [1]). Все это позволяет проводить государственную поверку приборов типа МТЦ-3 для официального подтверждения их основных метрологических характеристик.

При проведении очередных государственных испытаний вышеуказанных приборов была разработана новая методика поверки МРБ МП.1416–2022 [2], регламентирующая использование эталонного набора имитаторов неферромагнитных покрытий для воспроизведения толщины в начальном диапазоне от 15 до 500 мкм и высокоточного микрометра для ее предварительного опреде-

ления. При формировании такого набора необходимо измерить микрометром толщину каждого имитатора и определить погрешность ее измерений, которая не должна выходить за допускаемые пределы Δ_{lim} , которые для приборов МТЦ-3 составляют $\pm(0,5 + 0,006X\delta)$ мкм, где $X\delta$ – действительная толщина имитатора (среднее арифметическое значение показаний микрометра).

В ходе исследований выяснилось, что при измерениях толщины имитатора возможно различие показаний толщиномера и микрометра, обусловленное тем, что цилиндрический наконечник преобразователя прибора имеет полусферическое закругление, а стержневой наконечник микрометра заканчивается плоскостью. Разная форма окончаний измерительных наконечников приводит к тому, что при измерениях толщины имитатора, изготовленного из недостаточно твердого материала, закругленный наконечник преобразователя прибора и плоский наконечник микрометра по-разному продавливают его поверхность. В итоге среднеарифметическое значение показаний прибора может оказаться существенно меньше среднеарифметического значения показаний микрометра. Степень продавливания и значение обусловленной им дополнительной погрешности зависят от измерительного (контактного) усилия, твердости материала имитатора, гладкости его поверхности и радиуса закругления наконечника.

Далее будут приведены результаты исследований влияния формы измерительного наконечника на точность измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий, выполненных из разных материалов. При этом отметим, что конкретно в магнитодинамических приборах типа МТЦ-3 информативный сигнал возникает в момент отрыва преобразователя от покрытия, что снижает негативный эффект начального продавливания поверхности покрытия. В то же время полученные результаты актуальны при использовании толщиномеров любого принципа действия, в которых преобразователь имеет наконечник с малой контактной площадью.

Методика исследований состояла в измерениях высокоточным микрометром Mitutoyo Absolute Digimatic 2 с разрешающей способностью 0,1 мкм, обеспечиваемой в диапазоне от 0 до 25 мм, толщины образцов из неферромагнитных материалов, различающихся по твердости в максимально широком диапазоне (от фторопласта до керамики), в обработке результатов измерений и оценке их погрешностей. Начальная серия измерений получена микрометром в его исходной конструкции (с плоским завершением наконечника). Зависимость показаний микрометра от степени закругления торца прижимаемого к образцу цилиндра исследована с помощью двух специально изготовленных насадок на наконечник микрометра, заканчивающихся полусферами радиусами 3 и 5 мм. Толщину неферромагнитных покрытий воспроизводили имитаторы, изготовленные из различающихся по твердости материалов и имеющие порядковые номера, возрастающие по мере увеличения толщины имитаторов:

- 1, 3, 11 – образцы из алюминиевой фольги;
- 2, 4, 6, 7, 9, 15 – образцы из различных полимеров;
- 5, 8 – пленки из фторопласта;
- 10, 13 – пленки из полиэтилентерефталата (ПЭТ);

- 12 – пленка из полипропилена;
- 14 – рентгеновская фотопленка;
- 16 – пластина из керамики.

Измерения толщины всех имитаторов микрометром с наконечником без насадки позволили определить действительную толщину всех имитаторов, а также оценить качество их поверхности в зоне измерений.

Действительная толщина $X\partial$, мкм, каждого имитатора вычислена как среднее арифметическое значение десяти показаний микрометра.

Для оценки среднего квадратичного отклонения $\sigma[\Delta ou]$, мкм, отдельных показаний от $X\partial$ использована формула

$$\sigma[\Delta ou] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X\partial)^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

где i – порядковый номер показания микрометра; n – общее число его показаний, соответствующих конкретному имитатору (в данном случае $n = 10$); X_i – очередное (i -е) показание микрометра с наконечником без насадки, мкм.

Случайная составляющая Δou , мкм, абсолютной погрешности Δu вычислена по формуле

$$\Delta ou = tp \cdot \sigma[\Delta ou], \quad (2)$$

где tp – коэффициент Стьюдента (при $n = 10$ и доверительной вероятности $p = 0,95$ в первом приближении $tp = 2$).

Абсолютная погрешность Δu , мкм, измерений толщины имитатора микрометром с наконечником без насадки определена по формуле

$$\Delta u = \pm \sqrt{\Delta ou^2 + \Delta m^2}, \quad (3)$$

где Δm – абсолютная погрешность микрометра, $\Delta m = \pm 0,5$ мкм.

Относительная погрешность δu , %, вычислена по формуле

$$\delta u = \frac{\Delta u}{X\partial} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Результаты расчетов по формулам (1)–(4) приведены в табл. 1.

Исходя из формулы (3), абсолютная погрешность Δu по модулю не может быть меньше 0,5 мкм. По табличным данным видно, что только имитатор 11 имеет относительно большую Δu , тогда как у остальных имитаторов ее модуль не достигает даже 1 мкм. Исходя из допуска $\Delta \text{lim} = \pm(0,5 + 0,006X\partial)$ мкм, лишь указанный имитатор нельзя использовать для проведения испытаний или проверки приборов.

Табл. 1. Значения абсолютной Δ_i и относительной δ_i погрешностей измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий микрометром с наконечником без насадки

Номер имитатора	X_{∂} , мкм	Δ_{oi} , мкм	Δ_i , мкм	δ_i , %	Номер имитатора	X_{∂} , мкм	Δ_{oi} , мкм	Δ_i , мкм	δ_i , %
1	12,0	0,2	$\pm 0,5$	$\pm 4,2$	9	80,9	0,4	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$
2	12,4	0,4	$\pm 0,6$	$\pm 4,8$	10	103,9	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$
3	13,1	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 4,6$	11	104,3	1,3	$\pm 1,4$	$\pm 1,3$
4	21,2	0,2	$\pm 0,5$	$\pm 2,4$	12	175,3	0,2	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$
5	44,2	0,5	$\pm 0,7$	$\pm 1,6$	13	186,4	0,7	$\pm 0,9$	$\pm 0,5$
6	46,8	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 1,3$	14	211,4	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$
7	48,3	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 1,2$	15	323,6	0,8	$\pm 0,9$	$\pm 0,3$
8	48,5	0,5	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	16	500,7	0,3	$\pm 0,6$	$\pm 0,1$

Обработка остальных результатов, полученных с помощью двух насадок, выполнена по методике, применяемой при проведении испытаний приборов МТЦ-3. В частности, систематическая составляющая Δ_s , мкм, абсолютной погрешности Δ измерений толщины каждого имитатора вычислена по формуле

$$\Delta_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ni} - X_{\partial}, \quad (5)$$

где X_{ni} – очередное (i -е) показание микрометра, наконечник которого оснащен насадкой, мкм.

Для оценки $\sigma[\Delta_o]$, мкм, среднего квадратичного отклонения случайной составляющей Δ_o погрешности Δ использована формула (1), в которую вместо параметра X_i подставлена разность Δ_i очередного (i -го) показания микрометра и толщины X_{∂} , а вместо этой толщины – систематическая составляющая Δ_s , определенная по формуле (5). Случайная составляющая Δ_o , мкм, вычислена по формуле (2), в которую вместо параметра $\sigma[\Delta_{oi}]$ подставлена оценка $\sigma[\Delta_o]$. Абсолютная погрешность Δ , мкм, измерений толщины каждого имитатора микрометром с наконечником, оснащенным насадкой, определена по формуле

$$\Delta = \Delta_s \pm \Delta_o. \quad (6)$$

Выбор знака в формуле (6) зависит от значения параметра Δ_s : если оно положительное или нулевое, то к нему прибавляют значение параметра Δ_o , а если отрицательное, то отнимают.

Относительная погрешность δ , %, определена по формуле (4), в которую вместо параметра Δ_i подставлена погрешность Δ , вычисленная по формуле (6).

Все результаты вычислений представлены в табл. 2.

Из табличных данных следует, что самая большая по модулю погрешность Δ (или δ) имеет место при измерениях толщины имитаторов, изготовленных из такого легко сминаемого материала, как фторопласт.

Табл. 2. Значения абсолютной Δ_i и относительной δ_i погрешностей измерений толщины имитаторов неферромагнитных покрытий микрометром, оснащенным насадкой с окончанием радиусом r

Номер имитатора	$X\delta$, мкм	r , мм	\bar{X} , мкм	Δ_s , мкм	Δ_o , мкм	Δ , мкм	δ , %
1	12,0	5	9,5	-2,5	0,6	-3,1	-25,8
		3	8,7	-3,3	0,8	-4,1	-34,2
2	12,4	5	8,8	-3,6	0,7	-4,3	-34,7
		3	8,1	-4,3	0,9	-5,2	-41,9
3	13,1	5	11,8	-1,3	0,4	-1,7	-13,0
		3	11,2	-1,9	1,0	-2,9	-22,1
4	21,2	5	17,5	-3,7	1,2	-4,9	-23,1
		3	17,3	-3,9	1,0	-4,9	-23,1
5	44,2	5	29,3	-14,9	4,2	-19,1	-43,2
		3	23,1	-21,1	3,6	-24,7	-55,9
6	46,8	5	42,5	-4,3	0,9	-5,2	-11,1
		3	41,9	-4,9	0,8	-5,7	-12,2
7	48,3	5	43,9	-4,4	1,2	-5,6	-11,6
		3	43,3	-5,0	1,8	-6,8	-14,1
8	48,5	5	28,7	-19,8	2,1	-21,9	-45,2
		3	23,4	-25,1	2,5	-27,6	-56,9
9	80,9	5	75,3	-5,6	0,9	-6,5	-8,1
		3	73,9	-7,0	1,7	-8,7	-10,8
10	103,9	5	97,1	-6,8	1,4	-8,2	-7,9
		3	96,3	-7,6	1,1	-8,7	-8,4
11	104,3	5	92,5	-11,8	1,9	-13,7	-13,1
		3	86,3	-18,0	3,2	-21,2	-20,3
12	175,3	5	162,0	-13,3	2,8	-16,1	-9,2
		3	157,2	-18,1	4,2	-22,3	-12,7
13	186,4	5	178,7	-7,7	1,0	-8,7	-4,7
		3	177,7	-8,7	1,3	-10,0	-5,4
14	211,4	5	202,7	-8,7	1,3	-10,0	-4,7
		3	200,1	-11,3	2,4	-13,7	-6,5
15	323,6	5	305,6	-18,0	1,8	-19,8	-6,1
		3	299,3	-24,3	4,6	-28,9	-8,9
16	500,7	5	500,3	-0,4	0,5	-0,9	-0,2
		3	500,5	-0,2	0,6	-0,8	-0,2

Основной вклад в общую погрешность вносит ее систематическая составляющая Δ_s , обусловленная продавливанием поверхности имитатора полусферическим окончанием насадки. Видно также, что модуль этой составляющей увеличивается по мере уменьшения радиуса r полусферы (т. е. при сокращении площади поверхности наконечника, контактирующей с поверхностью имитатора). Единственным исключением из этого правила является имитатор из керамики, имеющей столь высокую твердость, что различие значений Δ_s уже не обусловлено разными значениями r , а имеет чисто случайный характер и является пренебрежимо малым по сравнению с толщиной X_d .

На случайную составляющую Δ_o мягкость материалов имитаторов тоже оказывает некоторое влияние: у керамического имитатора значения этой составляющей по модулю в разы меньше, чем, например, у обоих фторопластовых и полипропиленового имитаторов. Однако для очень малой толщины X_d составляющая Δ_o может оказаться слишком большой, что не позволит включить имитатор с такими характеристиками в состав формируемого набора.

Практические рекомендации при выборе имитаторов сводятся к тому, что их следует изготавливать из керамики, стекла или аналогичного по твердости неферромагнитного материала. Ввиду того, что такие материалы непригодны для изготовления тонких имитаторов, их можно изготавливать из ПЭТ либо одного из таких полимеров, из которых сделаны имитаторы 6, 7 и 9. Возможность использования конкретного имитатора необходимо определять экспериментально на основе измерений его толщины, обработки результатов по формулам (1)–(3) и сравнения полученного значения абсолютной погрешности Δ_i с допускаемыми пределами Δ_{lim} .

В целом приведенные результаты показывают, что при разработке толщиномеров покрытий и изготовлении наборов мер толщины покрытий для градуировки и испытаний этих приборов необходимо учитывать все факторы, связанные с геометрией рабочих окончаний преобразователей приборов и прижимными усилиями, механическими характеристиками используемых материалов. При этом значения реально возникающих погрешностей могут оказаться существенными и должны исследоваться и учитываться в установленном порядке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. О перечне категорий средств измерений [Электронный ресурс]: постановление Гос. комитета по стандартизации Респ. Беларусь, 20 апр. 2021 г., № 39 // Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – Режим доступа: <https://www.oei.by/section?id=117>. – Дата доступа: 11.07.2022.
2. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Толщиномеры покрытий магнитные цифровые МТЦ-3. Методика поверки: МРБ МП.1416–2022. – Взамен МРБ МП.1416–2004. – Минск: Ин-т прикл. физики НАН Беларуси, 2022. – 16 с.

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

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОЛЯ НА МАГНИТНУЮ АНИЗОТРОПИЮ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА СТАЛЕЙ

В. А. БУРАК

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

DEMAGNIZING FIELD VALUE INFLUENCE ON THE MAGNETIC ANISOTROPY OF ROLLED STEEL SHEET

V. A. BURAK

Аннотация. Проведены исследования влияния величины размагничивающего импульсного поля после намагничивания до технического насыщения на остаточную намагниченность листовой холоднокатаной конструкционной углеродистой стали в разных направлениях относительно прокатки. Показана возможность выбора такой величины размагничивающего поля, при котором точность и чувствительность импульсного магнитного контроля анизотропии магнитных свойств стального проката будет значительно выше, чем при использовании только импульсного намагничивания.

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

Abstract. Researching to explore the influence of the demagnetizing pulsed field value after magnetization to technical saturation on the residual magnetization of sheet cold-rolled structural carbon steel in different directions relative to rolling were held. It is shown the possibility of choosing the demagnetizing field value, at which the accuracy and sensitivity for pulsed magnetic testing of the magnetic properties anisotropy of rolled steel will be significantly higher than if using only pulsed magnetization.

Keywords: magnetization, magnetic testing methods, rolled steel, residual magnetization.

Дальнейшим развитием импульсного магнитного контроля несимметричности свойств листового проката, обусловленного технологическими особенностями производства, является повышение чувствительности и надежности. В [1–4] рассмотрен такой способ оценки анизотропии магнитных свойств, как анализ распределения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, взятого в различных направлениях относительно направления прокатки, над поверхностью листового стального проката. В [3] было показано, что для различных марок конструкционных углеродистых сталей анизотропию магнитных и механических свойств можно достаточно надежно оценивать после импульсного намагничивания доводящим до технического насыщения полем.

Одним из возможных способов повышения чувствительности и точности импульсного магнитного контроля структурного состояния конструкционных сталей является измерение остаточной намагниченности после намагничивания и частичного размагничивания образцов [5]. Рассмотрим аналогичный подход

повышения чувствительности импульсного магнитного контроля несимметричности свойств стального проката.

Для исследования возможности повышения чувствительности магнитного контроля несимметричности свойств листового проката конструкционных сталей, вызванных технологическими причинами, были рассмотрены образцы холоднокатаного листового проката из двух популярных марок углеродистых сталей 35 и 50. Образцы имели размер 200×200 мм², их толщина была 1,6 мм. Образцы были отожжены при $T_{отж} = 200$ °С для снятия внутренних напряжений, но такой низкой температуры термообработки не достаточно для изменения фазово-структурного состояния стали, что позволило сохранить изменение формы зерна. Измерения градиента остаточной намагниченности проводились с шагом в 2 мм вдоль и поперек направления прокатки.

Намагничивание и перемагничивание образцов осуществлялось при помощи намагничивающей системы прибора ИМА-6 [6]. Намагничивающий импульс поля был выбран из условия доведения исследуемых стальных образцов до технического насыщения и составлял $H = 250$ кА/м. Величины последующего противоположного по направлению импульсного магнитного поля изменялись от $H_p = 10$ кА/м до $H_p = 50$ кА/м. Для уменьшения влияния мешающих факторов результаты приведены как средние по трем разнесенным во времени сериям измерений.

На рис. 1 показаны кривые изменения величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности по поверхности образца листового проката стали 50, измеренные от середины пятна намагничивания, находившегося в центре образца, до края образца вдоль и поперек направления прокатки. Малое импульсное размагничивающее поле ($H_p = 10$ кА/м) и достаточно большие поля ($H_p = 40$ кА/м и выше) не выявляют значительного различия между распределениями остаточной намагниченности в различных направлениях. Как и в случае повышения точности контроля структурного состояния, связанных с ним механических характеристик и вызывающих изменение этих характеристик технологических процессов термической обработки, необходимо выбирать величину размагничивающего импульсного поля так, чтобы величина градиента нормальной составляющей напряженности остаточной намагниченности была близка к нулю после процесса намагничивания и последующего перемагничивания. Такой величиной размагничивающего поля в проведенных исследованиях является $H_p = 20$ кА/м. При таком размагничивающем поле наблюдается значительная разница между значениями остаточного магнитного поля по разным направлениям относительно прокатки.

Как видно из рис. 1, б, величины остаточной намагниченности в разных направлениях относительно прокатки в центре пятна намагничивания и при удалении от него на некоторое расстояние (около 30 мм) практически совпадают, однако потом наблюдается резкое увеличение величин остаточной намагниченности, измеренных поперек направления, относительно аналогичных величин, измеренных вдоль направления прокатки.

На рис. 2 приведены распределения величин градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности вдоль и

поперек направления прокатки по поверхности листового проката стали 35 после намагничивания импульсным полем $H = 250$ кА/м и размагничиванием при $H_p = 20$ кА/м. Для представленных кривых распределения характерны те же особенности, как и для образца из стали 50, однако различия в величинах остаточного поля менее значительны.

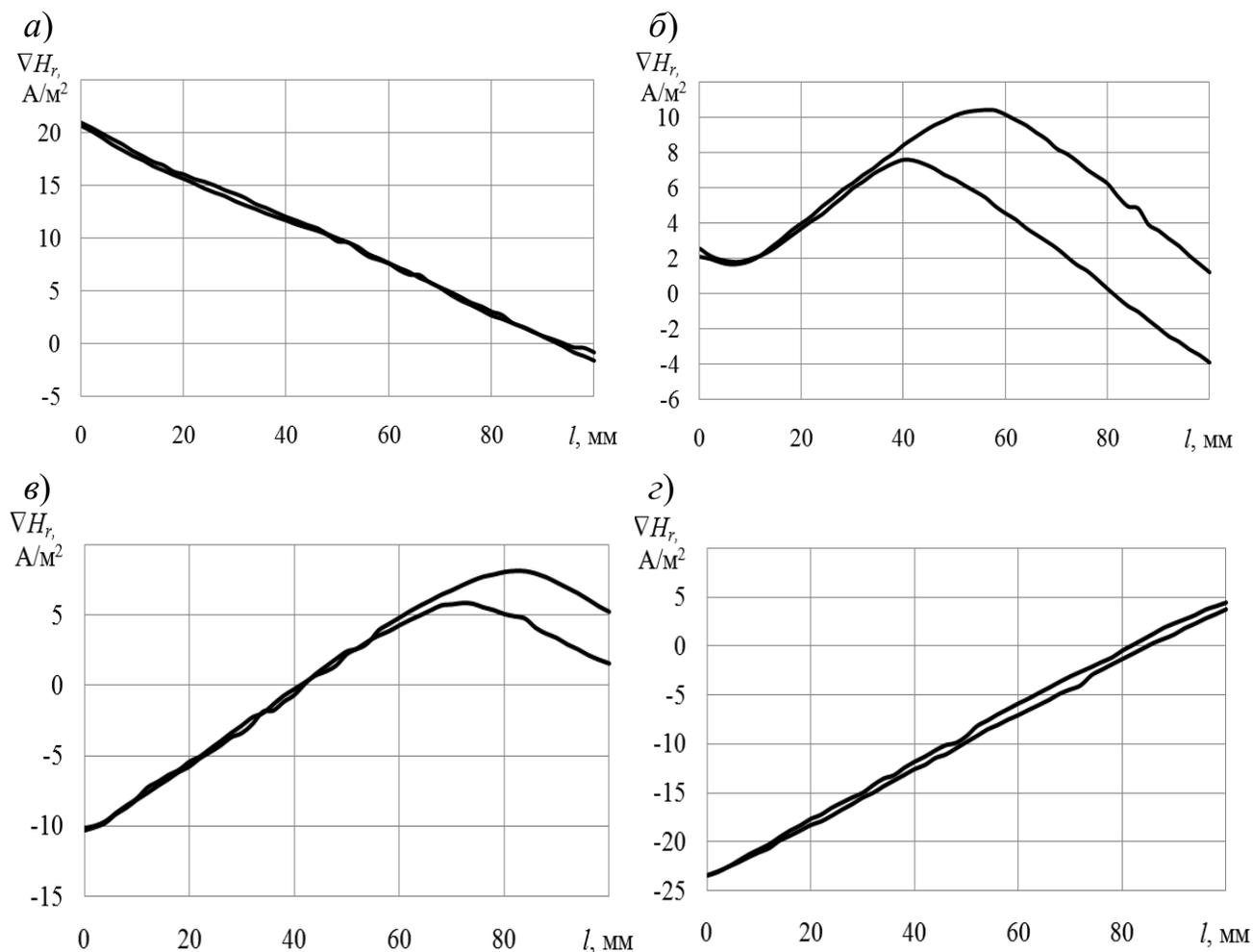


Рис. 1. Распределение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности вдоль и поперек направления прокатки по поверхности листового проката стали 50 при различных величинах импульсного размагничивающего поля: а – 10 кА/м; б – 20 кА/м; в – 30 кА/м; з – 50 кА/м

Анализ представленных кривых, полученных после намагничивания и размагничивания $H_p = 20$ кА/м образцов конструкционных углеродистых сталей 35 (см. рис. 2) и 50 (см. рис. 1, б), позволяет говорить о том, что оценку наличия и величины несимметричности магнитных свойств можно вести по ряду параметров, а не по одному, представляющему собой максимальную относительную разность величин градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, взятых вдоль и поперек направления прокатки, как было показано в более ранних работах по этой теме, например, по геометрическому положению максимальных значений остаточной намагниченности над поверхностью листового проката и по разности максимальных

значений градиента остаточной намагниченности, что расширяет номенклатуру чувствительных к анизотропии информативных параметров и позволяет в дальнейшем планировать анализ результатов исследования с использованием аппарата математической статистики.

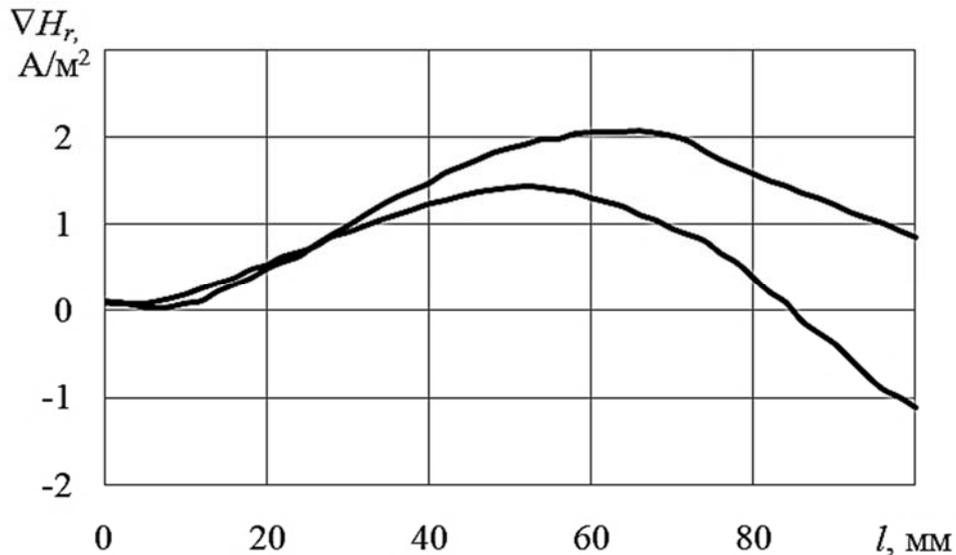


Рис. 2. Распределение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности вдоль и поперек направления прокатки по поверхности листового проката стали 35 при $H_p = 20 \text{ кА/м}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **Счастный, А. С.** Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А. С. Счастный, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.
3. **Бурак, В. А.** Влияние содержания углерода на анизотропию магнитных свойств холоднокатаной конструкционной среднеуглеродистой стали / В. А. Бурак // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2020. – № 2. – С. 11–20.
4. **Счастный, А. С.** Механическая и магнитная анизотропия листового проката сталей / А. С. Счастный, В. А. Бурак // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. VII Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сент. 2020 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 204–207.
5. **Матюк, В. Ф.** Контроль качества отпуска улучшаемых среднеуглеродистых марок сталей / В. Ф. Матюк, В. А. Бурак // Вес. НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 3. – С. 105–110.
6. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В. Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 62–74.

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

УДК 620.179.14

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

А. В. БЫЗОВ, Д. Г. КСЕНОФОНТОВ, В. Н. КОСТИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН

Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

THEORETICAL FOUNDATIONS AND IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF SELECTIVE EVALUATION OF SURFACE HARDENING QUALITY

A. V. BYZOV, D. G. KSENOFONTOV, V. N. KOSTIN, O. N. VASILENKO

Аннотация. Показано, что при намагничивании поверхностно упрочненного объекта с ростом толщины упрочненного слоя вследствие увеличения в нём плотности магнитного потока повышается тангенциальная компонента напряженности магнитного поля на поверхности объекта контроля и, вместе с этим, из-за возрастания магнитного сопротивления в цепи «преобразователь – объект» уменьшается нормальная компонента индукции магнитного поля в сердечнике преобразователя. Предложен способ избирательной оценки толщины и качества упрочненного слоя на неупрочненной сердцевине, в котором допускается, что измеряемые параметры будут соответствовать установленным интервалам, с использованием АПС DIUS-1.15М.

Ключевые слова: упрочненный слой, сердцевина, магнитное сопротивление, качество упрочнения, контроль толщины, аппаратно-программная система магнитной структуроскопии.

Abstract. It is shown that during magnetization of a surface-hardened object, the tangential component of the magnetic field strength on the tested object surface increases as magnetic flux density of hardened layer increases due to an increase of the thickness of the hardened layer and, at the same time, the normal component of the magnetic field induction in the transducer core decreases due to an increase in magnetic resistance in the «transducer – object» circuit. The method of selective estimation of layer thickness and degree of its hardening, assuming that the values of diagnostic parameters simultaneously fall into predetermined intervals of diagnostic parameters with the help of APS DIUS-1.15M, is proposed.

Keywords: hardened layer, core, magnetic resistance, quality of hardening, evaluation of thickness, hardware-software system of magnetic structurescopy.

Одним из наиболее распространенных методов магнитного контроля величины упрочненного слоя и его качества является коэрцитиметрическая методика. Её отличительная особенность заключается в том, что с использованием электромагнитов различных типоразмеров в промагничиваемом объеме упрочненного изделия определяется средняя коэрцитивная сила [1–5]. Несмотря на простоту данного метода с физической точки зрения, из-за использования двух электромагнитов кратно повышается время определения требуемых величин. Также остается актуальной проблемой высокая погреш-

ность измерения вследствие сложности расположения преобразователей в одной конкретной точке измерения для намагничивания одного и того же участка. Поэтому данная работа посвящена рассмотрению способа одновременного определения и глубины, и качества поверхностного упрочнения.

Для проведения модельных экспериментов использовалась программа FEMM 4.2 [6], в которой численно решается система уравнений Максвелла [7] методом конечных элементов. Геометрическая модель двуслойного контролируемого объекта и приставного преобразователя приведена на рис. 1. Задача является планарной, и глубина по оси z составляла 28 мм. Размеры намагничиваемого объекта – $200 \times 50 \times 27$ мм. Сечение полюса электромагнита – 12×28 мм. Расстояние между полюсами – 34 мм. Магнитодвижущая сила электромагнита – 1800 ав.

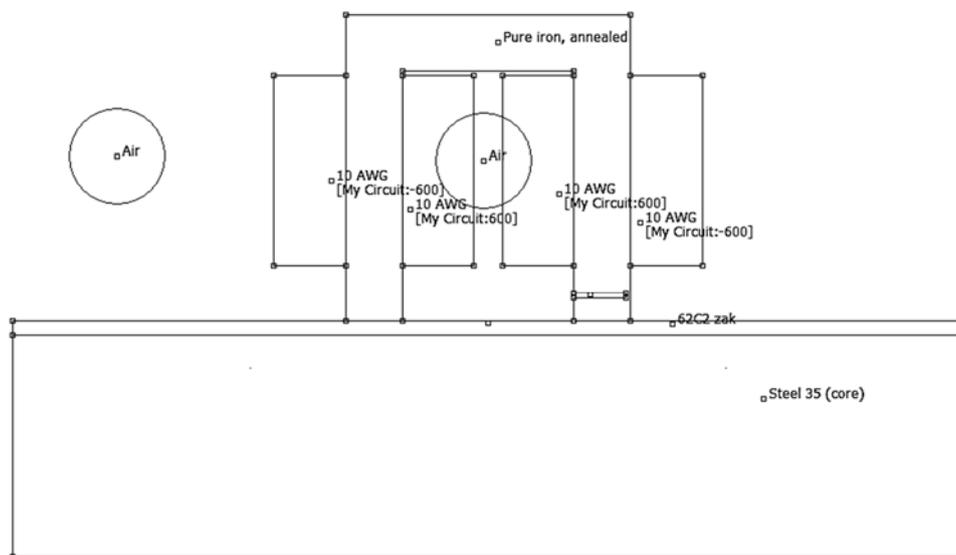


Рис. 1. Геометрическая модель

При расчете магнитных полей в данной модели использовались кривые намагничивания реальных материалов, а именно: сердцевина – отожженная при $850\text{ }^\circ\text{C}$ сталь 35 с феррито-перлитной структурой и упрочненный слой – закаленная от $870\text{ }^\circ\text{C}$ сталь 62C2 с мартенситной структурой, кривые намагничивания которых представлены на рис. 2. Глубина упрочненного слоя d варьировалась в пределах от 0 до 20 мм.

На рис. 3 показано распределение плотности магнитного потока (магнитной индукции) в цепи «преобразователь – объект» (см. рис. 3, а) и по глубине объекта в центральном сечении (см. рис. 3, б) при отсутствии упрочненного слоя. Видно, что с ростом глубины плотность магнитного потока монотонно уменьшается от $B_m = 0,54$ Тл на верхней грани (поверхности) объекта до $B = 0,09$ Тл на нижней грани. Принимая в качестве условной глубины проникновения магнитного потока d^* расстояние от поверхности объекта до глубины, на которой плотность потока уменьшается в 2 раза от максимальной величины, можно увидеть, что для однородного объекта $d^* = 21$ мм.

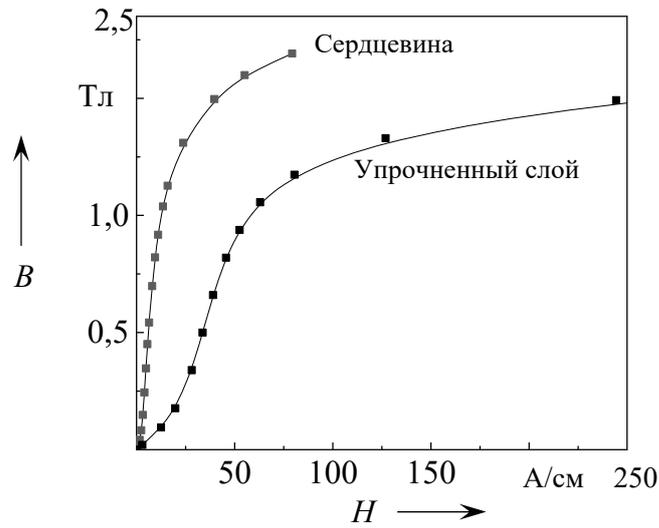


Рис. 2. Кривые намагничивания сердцевины и упрочненного слоя

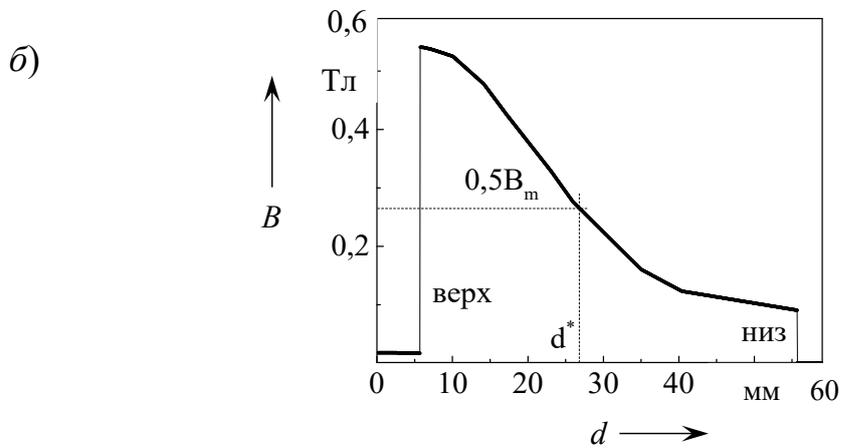
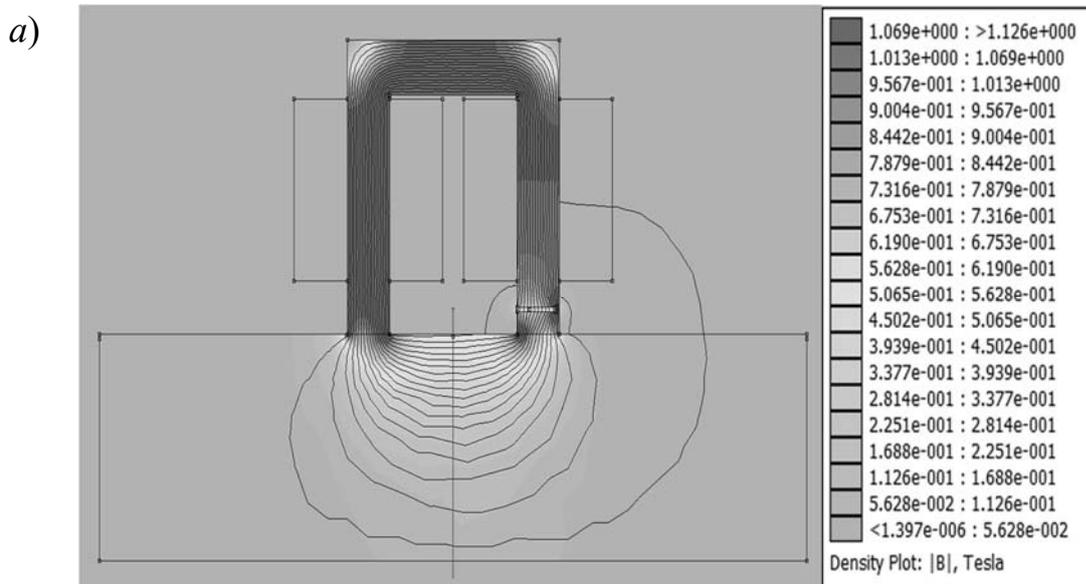


Рис. 3. Распределение плотности магнитного потока в магнитной цепи «преобразователь – объект» (а) и по глубине объекта в центральном сечении (б) при отсутствии упрочненного слоя

На рис. 4 представлены распределения магнитной индукции в цепи «преобразователь – объект» при различных толщинах упрочненного слоя.

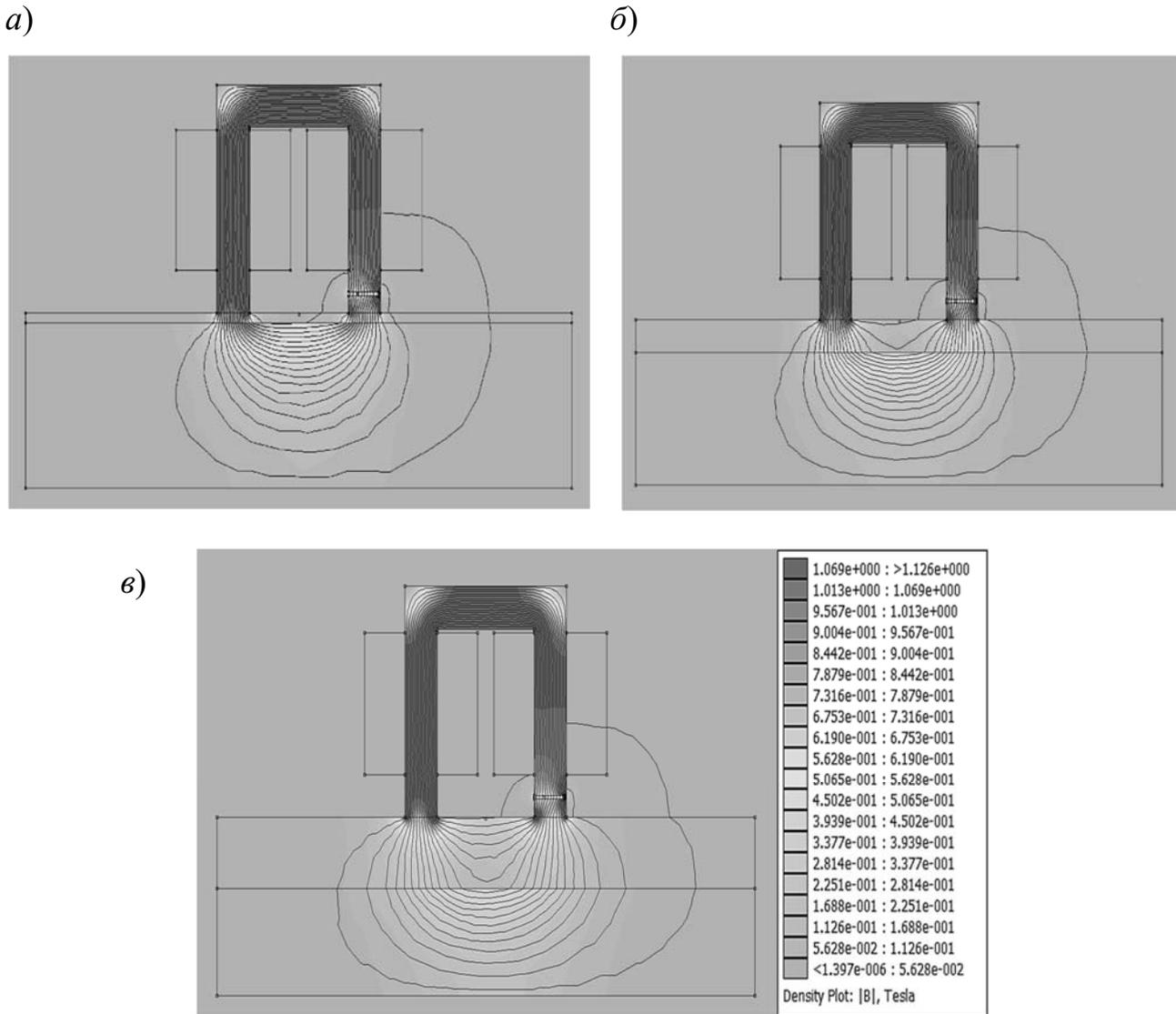


Рис. 4. Распределения магнитной индукции в магнитной цепи «преобразователь – объект» при различных толщинах упрочненного слоя: *a* – 3 мм; *б* – 10 мм; *в* – 20 мм

На рис. 5 представлены зависимости индукции магнитного поля от глубины объекта контроля в центральном сечении при различных толщинах упрочненного слоя.

При увеличении толщины упрочненного слоя, имеющего меньшую магнитную проницаемость в сравнении с сердцевинной, в них происходит перераспределение магнитных потоков, что сопровождается ростом условной глубины проникновения магнитного потока. Возрастание индукции в упрочненном слое должно приводить к повышению тангенциальной составляющей магнитного поля H_x , которое может быть измерено в межполюсном пространстве электромагнита на поверхности исследуемого объекта. При увеличении d растёт магнитное сопротивление цепи «преобразователь – объект», а значит, при этом в полюсе электромагнита снижается нормальная составляющая вектора маг-

нитной индукции B_y [3, 8].

Теоретические зависимости H_x и B_y , определенные по результатам моделирования, от толщины упрочненного слоя приведены на рис. 6.

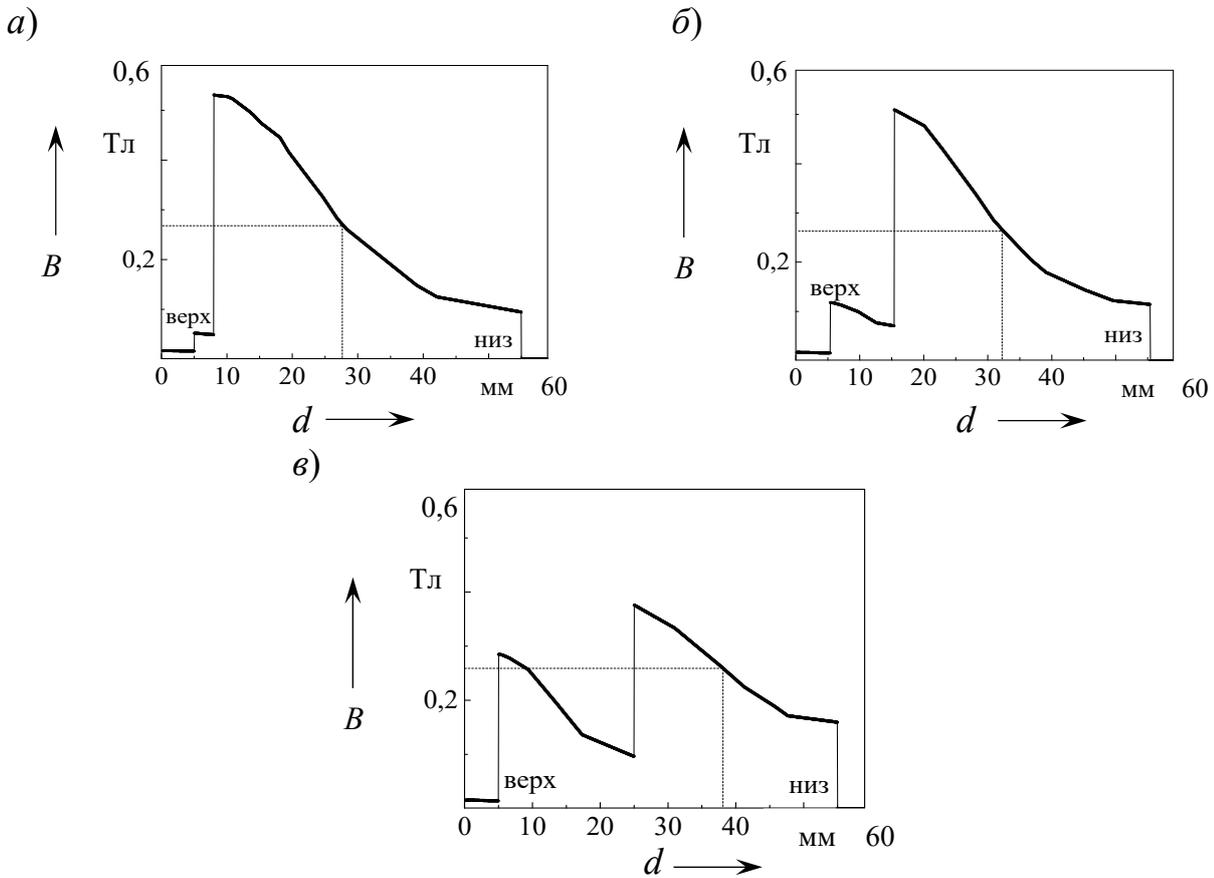


Рис. 5. Зависимости индукции магнитного поля от глубины объекта контроля в центральном сечении при различных толщинах упрочненного слоя: а – 3 мм; б – 10 мм; в – 20 мм

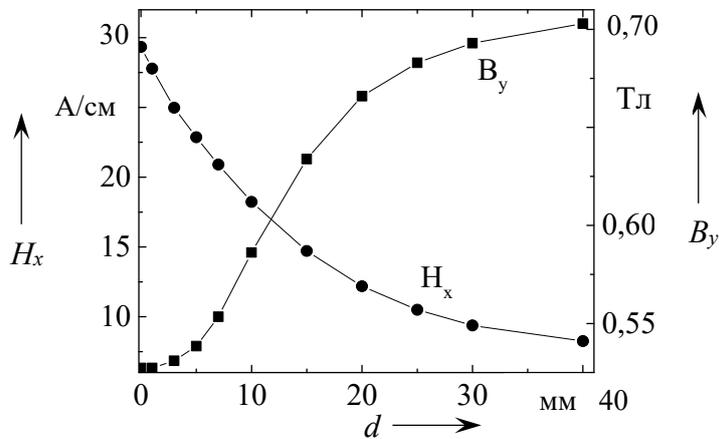


Рис. 6. Теоретические зависимости H_x и B_y от толщины упрочненного слоя

Для подтверждения теоретических результатов с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M [9] измеряется максимальный магнитный поток Φ_m и ток размагничивания I коэрцитиметра КИФМ-1 при каждом значении толщины упрочненного слоя, который был имитирован пластинами различной толщины, и обладающих различной твердостью и магнитными свойствами. Измерения проводились с U -образным электромагнитом с сечением полюсов 12×28 мм. На рис. 7 приведены точки в координатах $(d; I; \Phi_m)$.

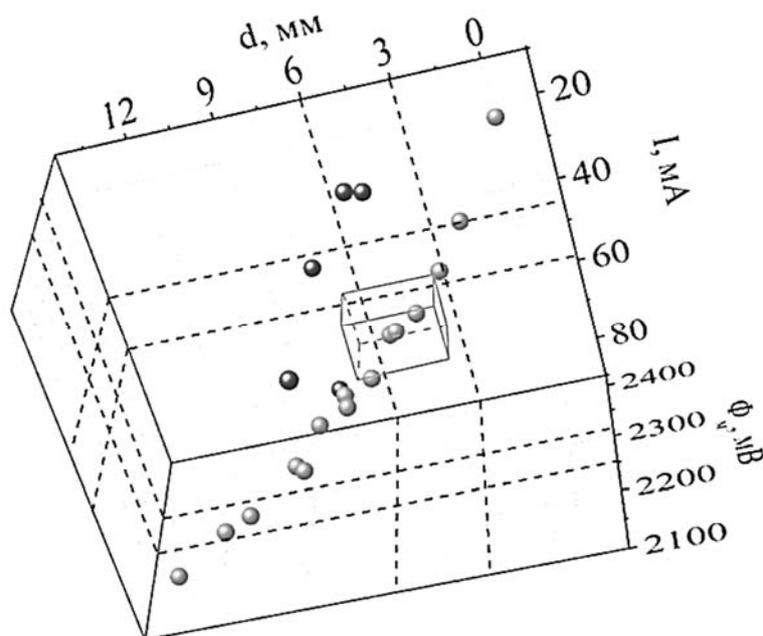


Рис. 7. Зависимость величины тока размагничивания и максимального магнитного потока от толщины нормально упрочненных (●) и отличающихся по магнитным свойствам (●) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине

Допустим, что требуемый диапазон глубин поверхностного упрочнения составляет 3...6 мм. Если значения толщины и качества упрочненного поверхностного слоя соответствуют заданным требованиям, то точка в координатах $(d; I; \Phi_m)$ должна попадать в область прямоугольного параллелепипеда на рис. 7. Непопадание в данную область свидетельствует о недостаточном поверхностном упрочнении образцов.

Показано, что магнитные потоки, которые проходят в упрочненном слое и сердцевине между полюсами электромагнита, перераспределяются с ростом толщины слоя. В поверхностном слое повышается величина магнитного потока, что приводит к последовательному нарастанию тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности такого изделия. Также при повышении глубины слоя наблюдается уменьшение нормальной составляющей магнитной индукции в сердечнике электромагнита вследствие увеличения общего магнитного сопротивления всей магнитной цепи. Предложена методика селективного контроля глубины и степени упрочнения поверхностного слоя с

использованием АПС DIUS-1.15М или подобных систем, предполагающая одновременное измерение коэрцитивной силы и магнитного потока в магнитной цепи «преобразователь – объект» и их соответствие установленным интервалам.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бида, Г. В.** Определение размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев / Г. В. Бида, М. Н. Михеев, В. Н. Костин // Дефектоскопия. – 1984. – № 8. – С. 10–16.
2. **Михеев, М. Н.** Контроль глубины и твердости закаленных с нагрева ТВЧ слоев на шейках коленчатого вала автомобиля / М. Н. Михеев, Г. В. Бида, В. Н. Костин // Дефектоскопия. – 1985. – № 8. – С. 12–17.
3. **Щербинин, В. Е.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / В. Е. Щербинин, Э. С. Горкунов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 266 с.
4. **Бида, Г. В.** Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле / Г. В. Бида, А. П. Ничипурок // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 3–8.
5. Возможности коэрцитиметрии для диагностики технического состояния валков стана горячей прокатки / С. А. Муриков [и др.] // Сталь. – 2011. – № 11. – С. 68–70.
6. Finite Element Method Magnetics [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.
7. **Tumanski, S.** Handbook of Magnetic Measurements. Warsaw University of Technology / S. Tumanski. – Taylor & Francis Group, LLC, 2011. – 383 p.
8. **Ахмеджанов, Р. А.** Физические основы магнитного неразрушающего контроля: конспект лекций / Р. А. Ахмеджанов. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2004. – 69 с.
9. **Костин, В. Н.** Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15М / В. Н. Костин, О. Н. Василенко, А. В. Бызов // Дефектоскопия. – 2018. – № 9. – С. 47–53.

УДК 621.81

**МАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННЫЙ
С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ****ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ*****Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. И. СВИСТУН, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ,
К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ, Л. И. ШАДУРСКАЯ***Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.81

OPTICAL DRIVEN MAGNETICORECOMBINATIONAL CONVERTER***R. I. VOROBAY, O. K. GUSEV, A. I. SVISTUN, A. K. TYAVLOVSKY,
K. L. TYAVLOVSKY***

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

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

Abstract. The features of photovoltaic cells in semiconductors with deep-level multiply-charged impurity are considered. The use of such structures can gain new functional properties of single-element optical driven magneticorecombinational receivers and optical diagnostics measuring transducers based on them.

Keywords: optical diagnostics, photoelectric converter, multiply charge impurity, magneticorecombinational converter, switching characteristics.

Оптические методы диагностики [1] применяются как для определения различных характеристик материалов и изделий – от геометрических размеров и дефектности до химического состава, так и для измерения параметров технологических и физических процессов, обеспечивая при этом неразрушающий характер контроля. При этом возможности оптических методов диагностики определяются, в основном, функциональными возможностями и параметрами фотоэлектрического преобразователя (ФЭП). Перспективным направлением является построение измерительных преобразователей систем оптической диагностики на основе полупроводниковых ФЭП с возможностью преобразования нескольких разнородных физических величин, изменяемой функциональностью и переключением поддиапазонов преобразования [2, 3].

Основу ряда функциональных ФЭП, пригодных для применения в системах оптической диагностики, составляют базовые фоторезистивные и барьерные структуры [3]. Для формирования многофункциональных ФЭП с переключаемыми характеристиками перспективно применение комбинации нескольких базовых структур. Например, для построения ФЭП, чувствительных к магнит-

ному полю и оптическому излучению, предлагается использование структуры магнитотранзистора [4], работающего на основе гальваномагниторекомбинационного (ГМР) эффекта, в котором область базы выполнена на основе полупроводника с низкой концентрацией глубокой примеси [3], формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний.

Если гальваномагниторекомбинационный преобразователь (ГМРП) находится в скрещённых электрическом и магнитном полях (рис. 1), то под действием силы Лоренца произойдёт смещение носителей зарядов к одной из боковых поверхностей, имеющих разные скорости рекомбинации [4] (поверхность 1 – высокую, 2 – низкую). Если направление магнитного поля таково, что заряды перемещаются к поверхности 1, то общая концентрация носителей зарядов уменьшается и, соответственно, возрастает сопротивление ГМРП. При обратном направлении вектора магнитной индукции изменяется направление силы Лоренца, что приводит к перемещению зарядов к поверхности 2, у которой малая скорость рекомбинации, и к общему увеличению концентрации зарядов, т. е. к уменьшению сопротивления ГМРП.

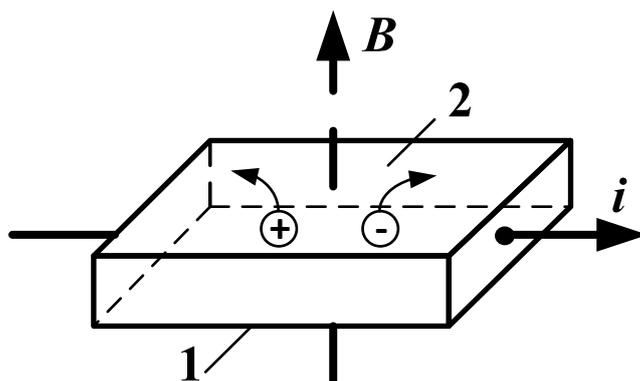


Рис. 1. Структура базового ГМР-преобразователя

Таким образом, в отличие от магниторезисторов, у которых изменение сопротивления не зависит от полярности магнитной индукции, у ГМРП изменение сопротивления зависит от направления вектора B . Следовательно, в магнитном поле ГМРП имеет свойства, аналогичные свойствам диода. Наиболее выражен рассматриваемый эффект у магнитотранзисторов с электрически управляемой магниточувствительностью. Полевой гальваномагниторекомбинационный транзистор состоит из полупроводниковой пластины (тип полупроводника близок к типу собственной проводимости), металлических электродов, предназначенных для подведения управляющего напряжения и изолированных слоями диэлектрика от полупроводниковой пластины и токовых электродов [4]. В зависимости от соотношения скоростей рекомбинации на гранях канала полевого транзистора и направления силы Лоренца происходит общее уменьшение или увеличение концентрации основных носителей по сравнению с равновесной. Это, в свою очередь, приводит к изменению электрического сопротивления канала полевого транзистора.

В качестве основного материала транзисторного ГМР-преобразователя предлагается использовать полупроводник с низкой концентрацией примеси [3], формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний. Физическую основу работы фотоприёмника, построенного на базе полупроводника с собственной фотопроводимостью [2, 3], составляет интеграция процессов внутри объёма чувствительной области, связанных с последовательной перезарядкой нескольких энергетических уровней различных зарядовых состояний глубокой примеси. Многозарядный примесный M -центр (МПЦ) может содержать от 0 до M электронов и, соответственно, находиться в $(M + 1)$ различных зарядовых состояниях (рис. 2).

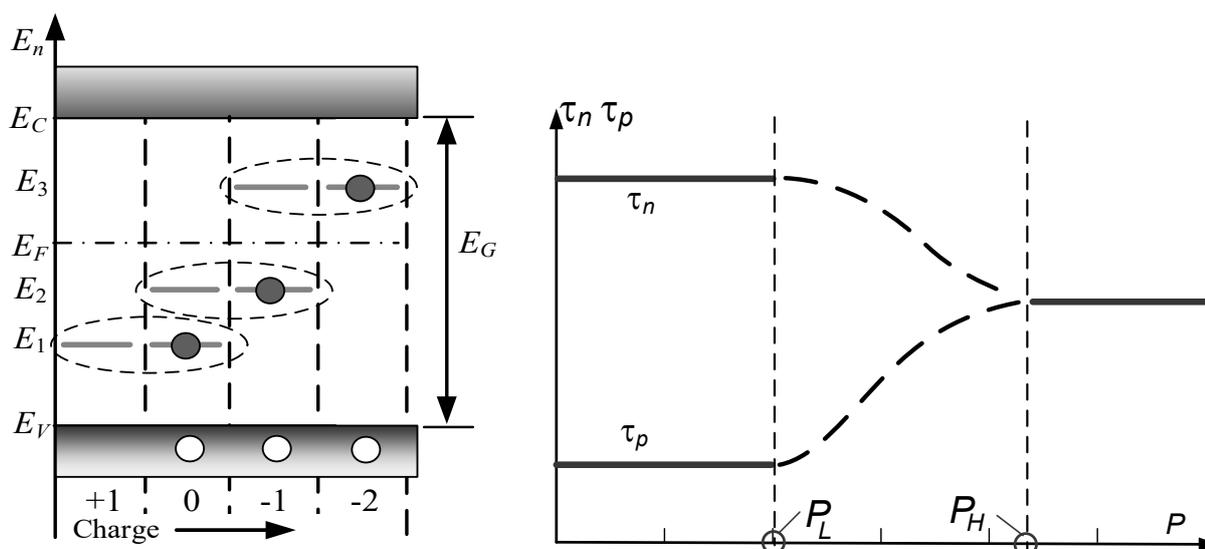


Рис. 2. Энергетическая диаграмма для примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями и зависимости постоянной времени рекомбинации акцепторной примеси от уровня оптического возбуждения

При пустом центре для электрона существует основное вакантное состояние, описываемое локальным уровнем энергии E_1 . При заполнении уровня E_1 для электронов «возникает» новое квантовое состояние с энергией E_2 , которое может быть занято вторым захваченным электроном [5]. Уровни возбуждения, при которых происходит изменение зарядовых состояний МПЦ, обозначены на рис. 2 как P_L и P_H . Причём уровня энергии E_2 не существует, пока уровень E_1 не занят хотя бы одним электроном.

Это обстоятельство составляет основное отличие энергетического спектра многозарядных центров от системы уровней, формируемых несколькими простыми центрами разных типов [5]. В случае нескольких однозарядных центров разных типов вся совокупность локальных уровней всегда существует полностью, независимо от степени заполнения отдельных уровней. Для многозарядной примеси нейтральному состоянию примесного центра соответствует нижний уровень E_1 , занятый электроном, и свободный уровень E_2 . При захвате электронов вышележащим уровнем энергия нижележащего уровня уже не может проявиться из-за сильного взаимодействия между двумя электронами

центра и их неразличимости. В зависимости от точного положения уровня Ферми в глубине запрещённой зоны в качестве активной выступает та или иная пара уровней.

Последнее обстоятельство позволяет, управляя заселённостью уровней путём электрической инжекции или дополнительной подсветкой [6], изменять значения постоянной времени рекомбинации и величину энергии ионизации примесного центра. Это приводит к изменению характеристик чувствительности преобразователей, принцип работы которых основан на рекомбинационных процессах, с одновременным изменением вида спектральной чувствительности ФЭП. Переключение между состояниями ФЭП происходит за время, равное времени жизни неравновесных носителей заряда. Для таких полупроводников, как германий и кремний, существует достаточно большой набор примесей, формирующих многозарядные центры [5].

Таким образом, предлагаемый ГМР-преобразователь представляет собой структуры биполярного транзистора с длинной базой (рис. 3, а) или полевого МДП-транзистора (рис. 3, б), в которых базовая область или канал выполнены из полупроводника с примесью, формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний.

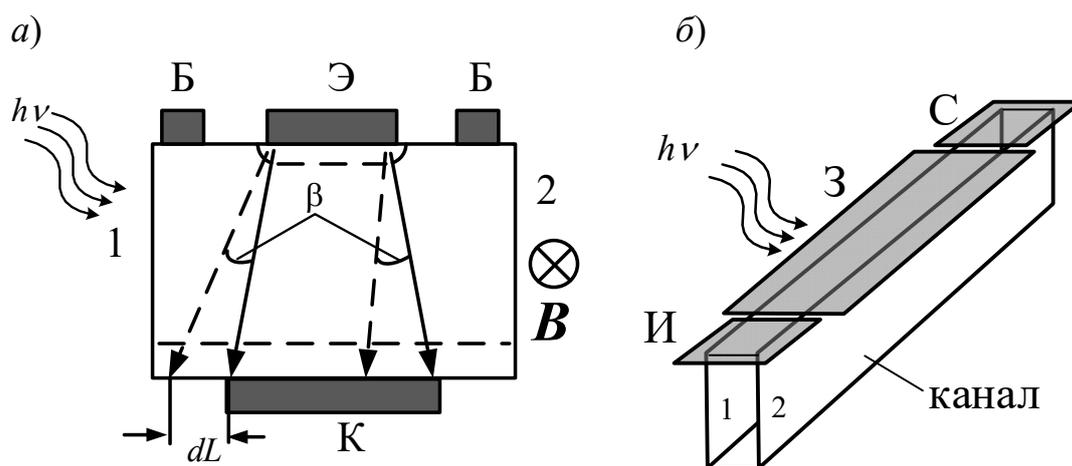


Рис. 3. Базовые приборные структуры ГМР биполярного (а) и полевого (б) транзисторов: 1 – освещаемая грань активной области структуры; 2 – неосвещаемая

Причём одна из сторон (на рис. 3 грань 1) активной области (базы или канала) для управления характеристиками ГМРП может быть освещена дополнительным оптическим излучением управляющего сигнала, а другая (грань 2) – всегда находится в «темноте». Под действием освещения в полупроводнике с примесью, формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, скорость рекомбинации существенно изменяется (см. рис. 2). Отметим [3], что скорость рекомбинации в полупроводниках с многозарядной примесью под действием внешних факторов (оптическое излучение) можно изменять на несколько десятичных порядков. Поток носителей заряда под действием магнитного поля B отклоняется на угол β и ток через приборную структуру уменьшается.

Относительное изменение проводимости активной области ГМРП под действием магнитного поля обращается в нуль при равенстве скоростей рекомбинации на обеих гранях и увеличивается при увеличении их разности [4].

Таким образом ГМР-транзисторы с активной областью на основе полупроводника с многозарядной примесью чувствительны к двум физическим величинам: магнитному полю и оптическому излучению. Это позволяет использовать их в качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей систем оптической диагностики, функциональных умножителей, компараторов оптического излучения при освещении обеих граней активной области, управляемых сенсоров, в которых чувствительность к одному параметру изменяется при воздействии на ГМРП фактора другой физической природы. Использование физической интеграции процессов внутри объёма чувствительного элемента и его приповерхностной области дает возможность сформировать ряд уникальных свойств таких ФЭП при простой конструкции и технологии изготовления приборной структуры. Применение эффектов, формируемых в объёме полупроводника по сравнению с использованием разности поверхностной и объёмной скоростей рекомбинации, позволяет повысить повторяемость свойств ГМРП при одновременном увеличении чувствительности преобразователя. Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и её концентрации дает возможность создавать фотоприёмники для заданных значений коэффициентов преобразования и спектрального диапазона оптического излучения (от 1 до 12 мкм).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 53696–2009.** Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения.
2. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределёнными состояниями / О. К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О. К. Гусева. – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // *Devices and Methods of Measurements*. – 2021. – № 2. – P. 108–116.
4. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин / Под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2018. – 158 с.
5. **Никитина, А. Г.** Бистабильные амфотерные центры в полупроводнике / А. Г. Никитина, В. В. Зуев // *Физика и техника полупроводников*. – 2008. – Т. 42, вып. 2. – С. 141–146.
6. Фотоприёмники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей / О. К. Гусев [и др.] // *Метрология и приборостроение*. – 2017. – № 2. – С. 34–42.

E-mail: ktyavlovsky@bntu.by.

УДК 621.179

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВОЛН РЭЛЕЯ РАЗЛИЧНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

A. С. ГОРДЕЕВА, С. С. СЕРГЕЕВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.179

STUDY OF THE EFFICIENCY OF EXCITATION OF RAYLEIGH WAVES BY DIFFERENT CONVERTERS

A. S. GORDEEVA, S. S. SERGEEV

Аннотация. Представлены сравнительные результаты экспериментальных исследований эффективности возбуждения рэлеевских волн с помощью стандартных ультразвуковых пьезопреобразователей.

Ключевые слова: дефектоскопия, ультразвуковой метод контроля, волны Рэлея, стандартные ультразвуковые пьезопреобразователи.

Abstract. Comparative results of experimental studies of the efficiency of excitation of Rayleigh waves using standard ultrasonic piezoelectric transducers are presented.

Keywords: flaw detection, ultrasonic testing method, Rayleigh waves, ultrasonic standard piezoelectric transducers.

Введение. При эксплуатации металлических конструкций часто возникают дефекты на поверхности или в подповерхностном слое. Для обнаружения таких дефектов на практике используют не только классический вихретоковый, капиллярный и магнитопорошковый контроль, но и ультразвуковые методы неразрушающего контроля.

В условиях производства имеет большое значение производительность контроля. Вихретоковый метод контроля и ультразвуковая дефектоскопия объемными волнами требуют сканирования всей поверхности объекта контроля, что занимает много времени. Ультразвуковые поверхностные волны обладают сравнительно малым затуханием, что позволяет им распространяться на большие расстояния. Это их свойство дает возможность проводить дискретное сканирование с большим шагом, что уменьшает временные затраты.

Контроль объектов, находящихся в эксплуатации, требует портативности и малого веса средств контроля, что ограничивает использование, например, магнитных методов контроля ввиду их громоздкости. В этом смысле контроль поверхностными ультразвуковыми волнами, обладая меньшими габаритами технических средств, представляет более широкие возможности.

Для реализации ультразвукового контроля поверхностными волнами могут использоваться поверхностные волны Рэлея в совокупности с подповерхностными поперечными и продольными волнами.

Для возбуждения волн Рэлея применяют несколько известных способов: с использованием встречно-штыревых пьезопреобразователей (ПЭП), с исполь-

зованием ПЭП с линией задержки в виде призмы, прямым ПЭП с торца объекта. В производственных условиях требуется выбрать такой способ, который обеспечил бы простое и надежное возбуждение поверхностных волн требуемой амплитуды [1].

Цель исследования. Получить сравнительные результаты экспериментальных исследований эффективности возбуждения рэлеевских волн с помощью стандартных пьезопреобразователей и сформулировать практические рекомендации по проведению контроля поверхностными волнами данными методами.

Оборудование и образцы для исследований. При проведении эксперимента применялись несколько способов возбуждения поверхностных волн:

- наклонный ПЭП с переменным углом ввода 11131-2,5-0-90-512;
- наклонный ПЭП с частотой 2,5 МГц и углом ввода 65°;
- 16-элементная фазированная решетка с частотой 4 МГц.

В исследовании использовались дефектоскопы Phasor XS и УД 4-76.

Для возбуждения поверхностных волн изготовлены клинья с углами 14° и 24° (рис. 1). Таким образом, для возбуждения поверхностной волны наклонным ПЭП с углом ввода 65° использован клин с углом 14°, а при применении датчика на фазированной решетке – клин 24°.

При проведении исследований в качестве отражателей использовались боковые торцевые поверхности образцов и различной глубины специальные поверхностные надпилы (рис. 2).

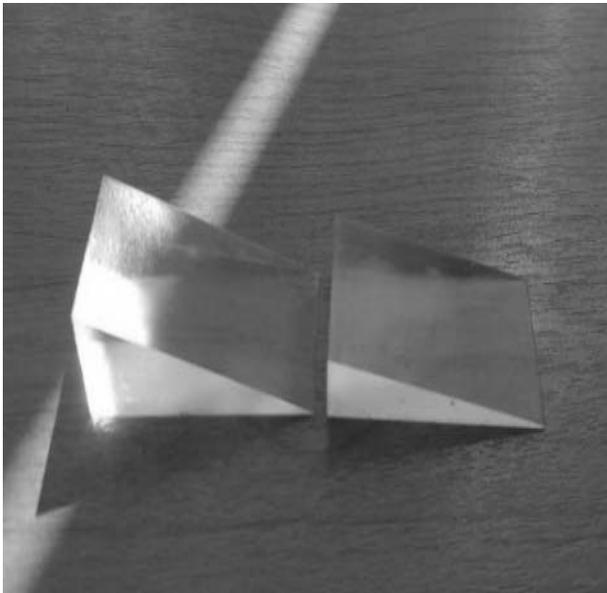


Рис. 1. Клинья из оргстекла с углами 24° и 14° соответственно



Рис. 2. Плоские образцы толщиной 8 мм с поверхностными надпилами глубиной 0,5; 1; 2 мм

Перед проведением эксперимента осуществлялась настройка приборов.

Далее для каждого из образцов с поверхностными надпилами различных размеров были получены значения амплитуд сигналов от их торцевой поверхности, а также от надпила каждым из представленных способов возбуждения поверхностных волн. Полученные данные приведены в табл. 1–3.

Табл. 1. Результаты измерений для образца 1 с надпилем глубиной 0,5 мм

Используемое средство	Усиление, дБ	Среднее значение амплитуды сигнала от торца, дБ	Среднее значение амплитуды сигнала от поверхностного надпила, дБ	Отношение средних значений амплитуд сигналов, полученных от торца и от канавки поверхностного надпила	
		$A_{cp}(m)$	$A_{cp}(n)$	ΔA	$A_{cp}(m)/A_{cp}(n)$
1. Наклонный датчик 65°/2,5 МГц с клином 14°	37	59,8	64,7	-4,9	0,92
2. Наклонный датчик 2,5 МГц с переменным углом ввода (90°)	57	43,16	37,42	5,74	1,15
3. Датчик на фазированной решетке с клином 24°	20,8	Амплитуда, %		-18,1	0,64
		32,4	50,5		

Табл. 2. Результаты измерений для образца 2 с надпилем глубиной 1 мм

Используемое средство	Усиление, дБ	Среднее значение амплитуды сигнала от торца, дБ	Среднее значение амплитуды сигнала от поверхностного надпила, дБ	Разница средних значений амплитуд сигналов, полученных от торца и от поверхностного надпила	
		$A_{cp}(m)$	$A_{cp}(n)$	ΔA	$A_{cp}(m)/A_{cp}(n)$
1. Наклонный датчик 65°/2,5 МГц с клином 14°	37	62,5	60,25	2,25	1,03
2. Наклонный датчик 2,5 МГц с переменным углом ввода (90°)	57	38,89	33,5	5,39	1,16
3. Датчик на фазированной решетке с клином 24°	20,8	Амплитуда, %		-3,5	0,9
		32,2	35,7		

Табл. 3. Результаты измерений для образца 3 с надпилем глубиной 2 мм

Используемое средство	Усиление, дБ	Среднее значение амплитуды сигнала от торца, дБ	Среднее значение амплитуды сигнала от поверхностного надпила, дБ	Разница средних значений амплитуд сигналов, полученных от торца и от поверхностного надпила	
		$A_{cp}(m)$	$A_{cp}(n)$	ΔA	$A_{cp}(m)/A_{cp}(n)$
1. Наклонный датчик 65°/2,5 МГц с клином 14°	37	66,24	66,17	0,7	0,94
2. Наклонный датчик 2,5 МГц с переменным углом ввода (90°)	57	39,11	39,02	0,09	1,002
3. Датчик на фазированной решетке с клином 24°	20,8	Амплитуда, %		7,7	1,2
		44,9	37,2		

Результаты экспериментальных исследований. Оценка эффективности того или иного метода возбуждения поверхностных волн производилась на основе сравнения величин амплитуды эхосигнала.

Так как коэффициент затухания характеризует ослабление амплитуды волны в зависимости от расстояния, пройденного данной волной, то для каждого способа возбуждения поверхностных волн необходимо сравнить две амплитуды на двух равных отрезках пути, пройденного волнами.

Для сопоставления амплитуд эхосигналов для возбуждаемых волн получены средние значения амплитуд сигналов от торца и от поверхностного надпила на каждом из образцов (путь, прошедший волной от ПЭП до торца, равен пути, прошедшему волной от ПЭП до надпила). Ослабление волны можно оценить отношением средних значений амплитуд сигналов от поверхностного надпила и от торцевой поверхности.

Оценив результаты измерений на образцах 1 и 2, можно сделать вывод о том, что наименьшее ослабление амплитуды получено при применении для возбуждения поверхностных волн преобразователя на фазированной решетке с клином 24°. По результатам измерений на образце 3 лучший результат был достигнут при работе на наклонном преобразователе с частотой 2,5 МГц, углом ввода 65° и клином 14°.

С точки зрения стоимости однозначно самым приемлемым вариантом является применение наклонного преобразователя AFN2.5-1010-65L. А если речь идет об удобстве при эксплуатации, то самым удобным оказался наклонный ПЭП с переменным углом ввода 11131-2,5-0-90-512 ввиду того, что для

комфортной работы на нем необходимо только настроить призму самого преобразователя в отличие от способов с применением клиньев.

Практические рекомендации. При применении рассмотренных методов возбуждения поверхностных волн при контроле реальных образцов необходимо внесение поправок в настройки прибора, а именно информации об используемом преобразователе и об объекте контроля. Также в каждом конкретном случае следует произвести настройку скорости и временной задержки в призме.

При использовании клиньев совместно со стандартным преобразователем необходимо установить преобразователь на поверхности клина таким образом, чтобы сигналы, полученные от торцевой грани клина, не отображались на развертке прибора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеева, А. С. Оценка эффективности возбуждения волн Рэлея различными преобразователями / А. С. Гордеева, С. С. Сергеев, О. С. Сергеева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – 516 с.

E-mail: llanyalllanyall@mail.ru, sss.bru@tut.by.

УДК 621.179

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕННЫХ ПРОТЕКТОРОВ ДЛЯ НАКЛОННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

A. С. ГОРДЕЕВА, С. С. СЕРГЕЕВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.179

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF REPLACEABLE PROTECTORS FOR INCLINED ULTRASONIC PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

A. S. GORDEYEVA, S. S. SERGEEV

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности применения сменных протекторов из полимерных материалов с различной кривизной контактной поверхности для стандартных наклонных ультразвуковых пьезопреобразователей.

Ключевые слова: дефектоскопия, протекторы, ультразвуковой метод контроля, наклонные ультразвуковые пьезопреобразователи, кривизна контактной поверхности.

Abstract. We present the results of experimental research into the effectiveness of using interchangeable protectors made of different materials with different curvature of the contact surface for standard inclined ultrasonic piezoelectric transducers.

Keywords: flaw detection, ultrasonic testing method, ultrasonic piezoelectric transducers curvature of the contact surface.

Ультразвуковой контроль материалов и изделий обеспечивает на сегодняшний день наиболее высокую достоверность, производительность и информативность при выявлении дефектов. Традиционными объектами контроля в энергетике, нефтехимической отрасли и в машиностроении являются металлические прутки и трубы различного типоразмера по диаметру и толщине стенок. Все эти объекты отличаются кривизной поверхности и требуют применения специальных приемов обеспечения качественного акустического контакта с ультразвуковыми преобразователями.

В соответствии с нормативными документами на ультразвуковой контроль объектов типа труб или прутков (ГОСТ Р 55724–2013, ГОСТ Р ИСО 16811–2016 и др.) в практике необходима притирка призмы наклонных ПЭП до кривизны объекта, благодаря чему достигается стабильный акустический контакт притертой поверхности при минимальной толщине смазки. Таким образом, для эффективной работы дефектоскопистам необходимо иметь для каждого диаметра из огромного разнообразия объектов отдельный притертый ПЭП, что очень дорого обходится для лабораторий неразрушающего контроля.

Для решения указанной проблемы предлагается использование сменных насадок-протекторов и стандартных ПЭП с плоской контактной поверхностью [1]. Целью исследований является выбор вариантов настройки чувстви-

тельности по различным образцам и введение поправок при осуществлении контроля реальных объектов.

При проведении экспериментов использовались ультразвуковой дефектоскоп USM Go и наклонные преобразователи производства SIUI с рабочей частотой 2,5 и 5 МГц, с углами наклона призмы 50°, 65° и 70°. Используемые модели преобразователей данного производителя имеют одинаковую форму поверхности и геометрические размеры.

Для проведения исследований при помощи программы Компас-3D V16 были подготовлены 3D-модели протекторов различной кривизны контактных поверхностей (98, 102, 108, 159 мм) для контроля труб соответствующих наружных диаметров, а также плоскодонные протекторы для определения величины поправок, вносимых при настройке прибора. Форма протектора выбиралась такой, чтобы обеспечивалось хорошее крепление на преобразователе с минимальными зазорами. По полученным 3D-моделям эти протекторы (рис. 1) были изготовлены на 3D-принтерах. При изготовлении протекторов были использованы два принтера с различными смолами в качестве фотополимерных материалов (табл. 1) [1].



Рис. 1. Протекторы из различных материалов с кривизной контактных поверхностей 98, 102, 108, 159 мм

Табл. 1. 3D-принтеры и фотополимеры, использованные в них

Модель принтера	Фотополимерный материал	Название протектора из соответствующего материала
Medit T 510	Photopolymer Grey Pro Resin flpr gro1	Серый
Anycubic Photon Mono X	Anycubic 3D Printing UV Sensitive Resine Basic Grey	Синий
	Gorky Liquid Detal Model LCD/DPL	Бежевый

Для расчетной оценки чувствительности преобразователей с протектором проведено теоретическое моделирование акустического тракта для объекта с различными искусственными дефектами.

Формулы акустического тракта позволяют определить ослабление амплитуды ультразвукового сигнала на пути источник – дефект – приёмник. При выполнении расчетов принимаем, что реальный дефект – это отражатель

правильной формы. В сварных швах возможны дефекты в виде пор, разнонаправленных трещин и непроваров в корне шва. Данные дефекты моделируются сферой, диском и двугранным углом соответственно [2].

Рассмотрим объект с толщиной основного металла 12 мм с отражателем в форме бесконечно тонкого диска. Расчетная схема обнаружения отражателя преобразователем с протектором представлена на рис. 2. Это случай акустического тракта, когда приемник и излучатель совмещены. Модель в виде тонкого диска считается направленным отражателем. Угол ввода 65° , толщина протектора 1 мм, частота 2,5 МГц.

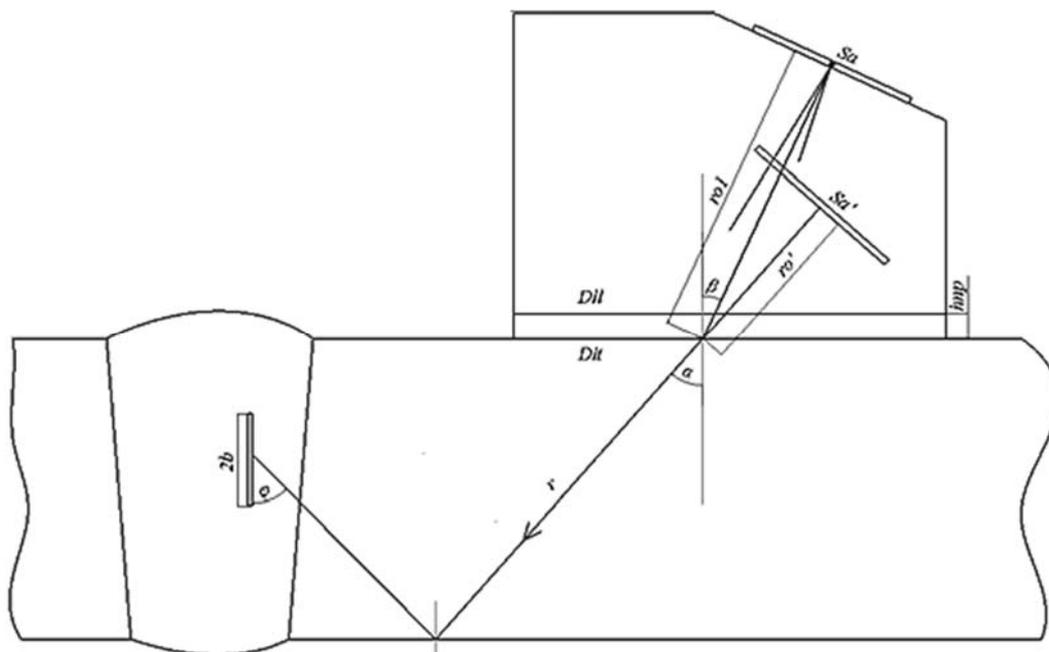


Рис. 2. Схема обнаружения отражателя преобразователем с протектором

При применении протектора уравнение акустического тракта P/P_0 для бесконечно тонкого диска принимает вид [2]

$$\frac{P}{P_0} = \frac{R_t \cdot D_{lt} \cdot D_{ll} \cdot S_a \cdot \pi \cdot b^2 \cdot \cos \alpha}{\lambda_t^2 \cdot (r + r_0')^2 \cdot \cos \beta} \cdot e^{-2 \cdot (\delta \cdot r + \delta_{np} \cdot r_0 + \delta_{nm} \cdot h_{nm} / \cos \beta)},$$

где α – угол ввода, $\alpha = 65^\circ$; β – угол призмы, $\beta = 49,4^\circ$; b – радиус дефекта ($1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $2 \cdot 10^{-3}$ м; $2,5 \cdot 10^{-3}$ м); S_a – площадь пьезопластины ($3,14 \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2$ м); r – длина пути ультразвука от точки выхода луча до дефекта, $r = 25 \dots 50$ мм; λ_t – длина волны ультразвука в объекте, $\lambda_t = 1,28$ мм; D_{lt} – коэффициент прохождения через границу раздела призма – объект, $D_{lt} = 0,2$; R_t – коэффициент отражения от поверхности дефекта, $R_t = 1$; δ_{np} – коэффициент затухания в материале призмы, $\delta_{np} = 58$ 1/м; r_0 – средний путь ультразвука в призме

преобразователя, $r_0 = 10$ мм; r'_0 – приведенный путь ультразвука в призме преобразователя; δ – коэффициент затухания в материале объекта, $\delta = 4$ 1/м; D_{ll} – коэффициент прохождения через границу призма – протектор, $D_{ll} = 0,8$; δ_{nm} – коэффициент затухания в материале протектора, $\delta_{nm} = 46$ 1/м; h_{nm} – толщина протектора, $h_{nm} = 1$ мм.

Приведенный путь ультразвука в призме преобразователя в этом случае примет вид

$$r'_0 = r_{01} \frac{C_{l1}}{C_{l2}} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \frac{h_{nm}}{\sin \alpha}.$$

Если размер отражателя 2 мм, а длина пути ультразвука от точки выхода луча до него 0,035 м, можно определить теоретическую поправку к чувствительности в децибелах, которую необходимо учитывать при использовании протектора. Величина поправки в данном случае равна разности 1–2 (рис. 3).

Таким образом, используя данные, приведенные на рис. 3, можно определить поправки к чувствительности для контроля дисковых отражателей 1,5; 2 и 2,5 мм.

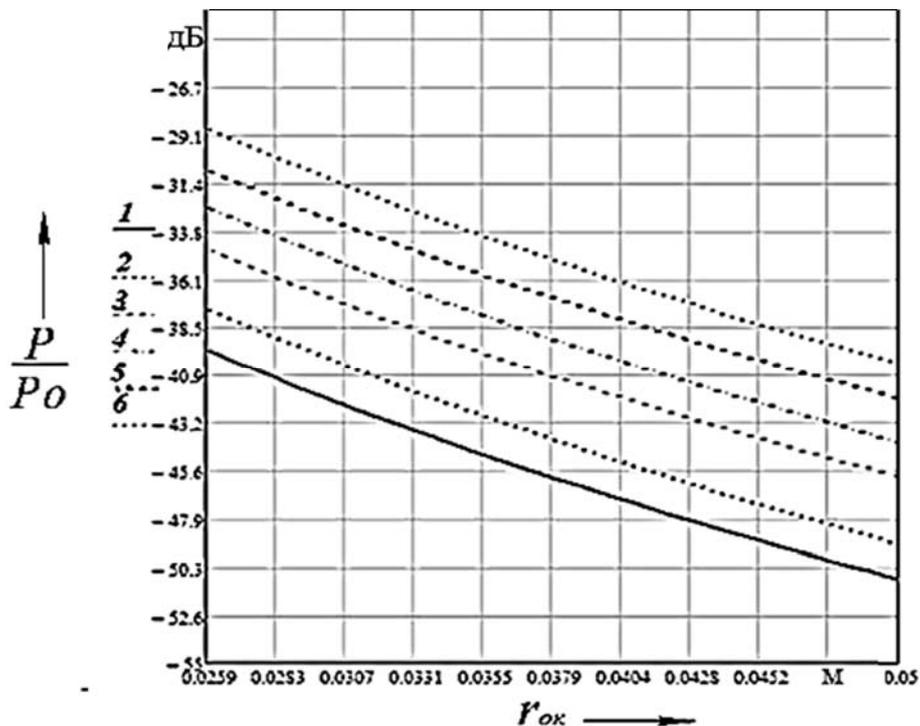


Рис. 3. Зависимость чувствительности от размера дефекта и длины пути ультразвука от точки выхода луча до дискового отражателя: 1 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм с протектором; 2 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм без протектора; 3 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм с протектором; 4 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора; 5 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2,5 мм с протектором; 6 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора

При применении протектора уравнение акустического тракта P/P_0 для сферического отражателя принимает вид (рис. 4)

$$\frac{P}{P_0} = \frac{D_{ll} \cdot D_{lt} \cdot S_a \cdot b \cdot \cos \alpha}{2 \cdot \lambda_t \cdot (r + r_0')^2 \cdot \cos \beta} \cdot e^{-2 \cdot (\delta \cdot r + \delta_{np} \cdot r_0 + \delta_{nm} \cdot h_{nm} / \cos \beta)}$$

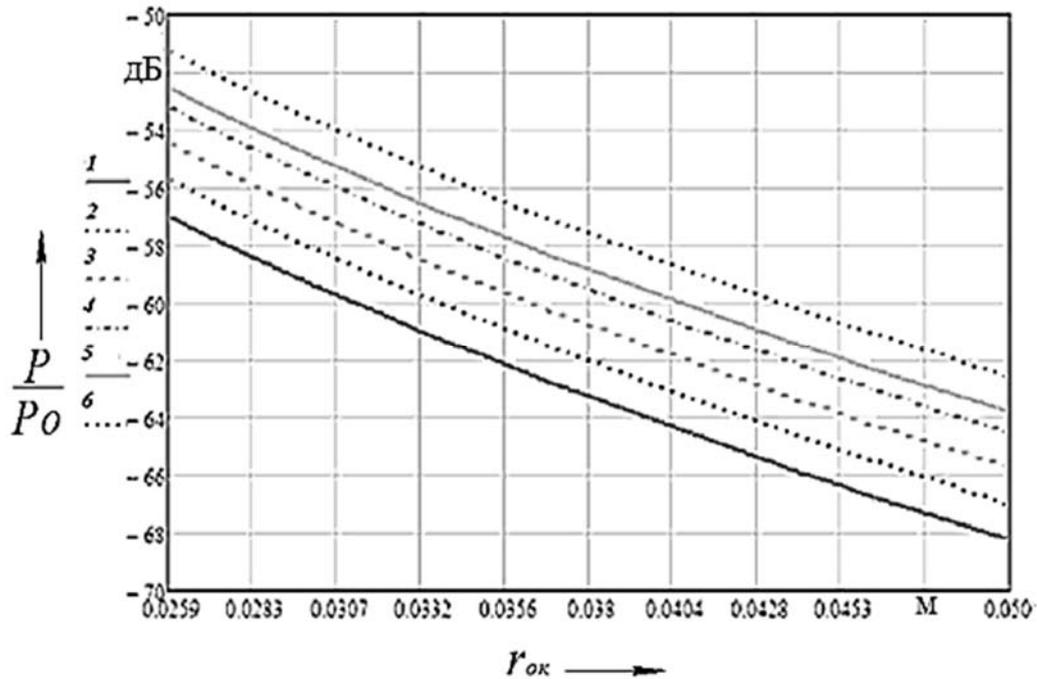


Рис. 4. Зависимость чувствительности от размера дефекта и длины пути ультразвука от точки выхода луча до сферического отражателя: 1 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм с протектором; 2 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм без протектора; 3 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм с протектором; 4 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора; 5 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2,5 мм с протектором; 6 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора

Рассмотрим объект с отражателем в форме двугранного угла, моделирующего непровар в корне шва. Данный отражатель можно заменить полосой, т. к. обычно подобные непровары являются протяженными по отношению к пучку ультразвука.

При применении протектора уравнение акустического тракта P/P_0 для бесконечной полосы шириной b принимает вид (рис. 5)

$$\frac{P}{P_0} = \sqrt{2} \frac{D_{ll} \cdot D_{lt} \cdot S_a b \cos \alpha}{\left[\lambda_t (r + r_0') \right]^{3/2} \cos \beta \sin \alpha} \cdot e^{-2 \cdot (\delta \cdot r + \delta_{np} \cdot r_0 + \delta_{nm} \cdot h_{nm} / \cos \beta)}$$

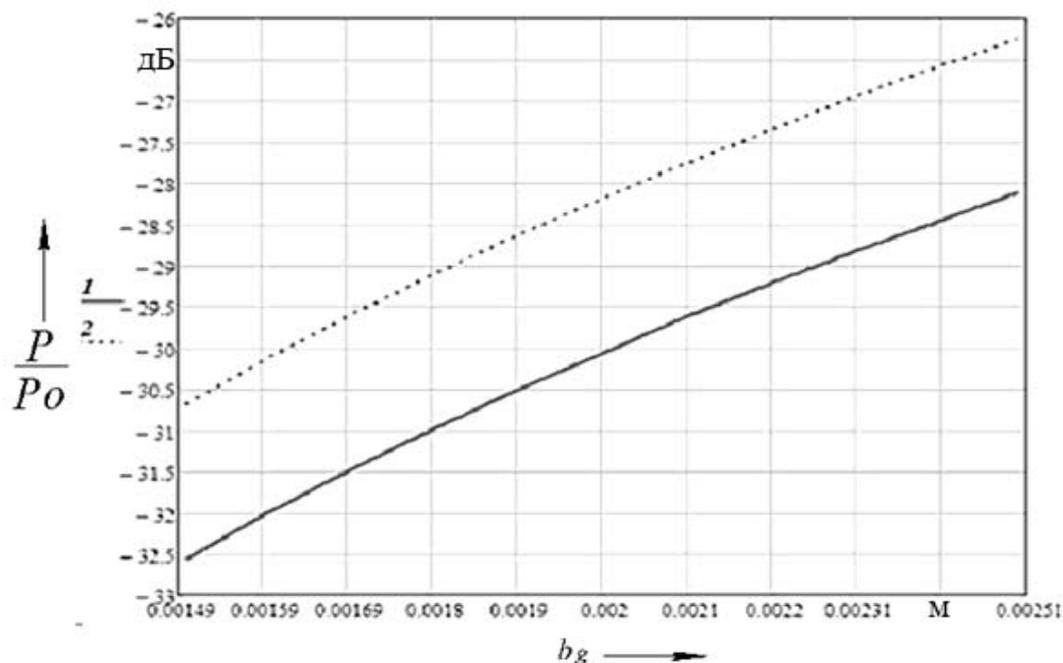


Рис. 5. Зависимость чувствительности от размера дефекта при длине пути ультразвука от точки выхода луча до дефекта $r = 25$ мм: 1 — P/P_0 при контроле бесконечной полосы шириной b_g с протектором; 2 — P/P_0 при контроле бесконечной полосы шириной b_g без протектора

В процессе исследования настройка чувствительности контроля производилась по следующим методикам:

- на стандартном образце СО-2 преобразователем без протектора;
- на стандартном образце СО-2 преобразователем с плоским настроечным протектором;
- на стандартном образце СО-3 преобразователем без протектора с последующей корректировкой чувствительности;
- на стандартном образце СО-3 преобразователем с плоским протектором [1].

Настройка прибора производилась сначала на стандартном образце СО-3, а затем по образцу СО-2.

Значения стрелы и задержки, найденные для каждого преобразователя, используемого как в отдельности, так и совместно с каждым из протекторов, приведены в табл. 2.

Значения угла ввода луча и координат бокового цилиндрического отверстия, найденные для каждого преобразователя, используемого как в отдельности, так и совместно с каждым из протекторов, приведены в табл. 2.

Были найдены реальные значения координат залегания БЦО на углах, полученных при настройке прибора на СО-2. Сравнив экспериментально полученные данные с реальными по каждому из углов, была найдена абсолютная погрешность измерения значений Pa и Da (табл. 3).

Значения абсолютной погрешности на различных преобразователях с различными протекторами представлены гистограммой на рис. 6.

Табл. 2. Поправки, полученные при настройке на образцах СО-3 и СО-2

Преобразователь	Протектор		СО-2				СО-3			Угол, град	Стрела, мм	Задержка, мкс
	Название	Толщина, мм	Амплитуда, %	Усиление, дБ	D_a , мм	P_a , мм	Амплитуда, %	Усиление, дБ	S_a , мм			
2,5 МГц/ 50°	Серый	0,5	53	56,4	44,38	52,28	63	42,2	55	51	9	6,07
	Серый	1	52	60,8	45,73	53,05	50	46		52	9	6,815
	Синий	2	83	68	44,6	51,95	57	48		48	7	8,325
	Бежевый	2	48	56,8	45,16	52,02	62	38		51	9	7,95
	Без протектора		51	20,4	43,5	51,45	77	23,8		50	9	4,5
2,5 МГц/ 70°	Серый	0,5	32	66,6	15,15	41,6	40	49,0		70	11	8,877
	Серый	1	30	66,6	14,6	40	30	44,2		71	11	8,377
	Синий	2	40	61,4	13,95	38,3	40	45		72	12	10,197
	Бежевый	2	35	57,8	14,5	39,49	34	39,8		70	10	8,729
	Без протектора		44	40	14,35	39,42	35	24,8		69	11	6,527
2,5 МГц/ 65°	Серый	0,5	48	67	14,4	30	51	54,6		64	9	6,837
	Серый	1	53	80	14,2	30,3	65	56,0		64	9	7,683
	Синий	2	56	76,2	14,2	30,4	66	63,2		66	11	7,482
	Бежевый	2	55	72,8	14,5	30,35	58	58	65	9	9,015	
	Без протектора		60	52,2	13,56	29,8	37	34	65	10	6,509	
5 МГц/ 70°	Серый	0,5	45	68,2	15,37	42,23	62	68,2	72	11	7,808	
	Серый	1	50	75	14,5	40,08	41	65	70,5	11	7,646	
	Синий	2	32	72,2	14,2	38,9	41	55	70,5	10	9,382	
	Бежевый	2	43	74	15,18	41,7	40	54,4	71	10	8,337	
	Без протектора		38	49	14,33	39,38	36	26,8	72	10	7,270	

Проанализировав значения полученных погрешностей, можно сделать вывод о том, что лучше всего себя показал преобразователь с частотой 2,5 МГц и углом 65°, т. к. данные, полученные при измерении этим преобразователем, имеют наименьшую абсолютную погрешность из представленных на гистограмме.

Табл. 3. Абсолютная погрешность измерения значений Pa и Da на каждом из углов, полученных при настройке по образцу СО-2

Преобразователь	Протектор		Измеренные		Реальные		Абсолютная погрешность	
	Название	Толщина, мм	Da , мм	Pa , мм	Da , мм	Pa , мм	Da , мм	Pa , мм
2,5 МГц/ 50°	Серый	0,5	44,38	52,05	44,0	56,31	0,38	-4,26
	Серый	1	45,73	51,28	44,0	54,33	1,73	-3,05
	Синий	2	44,6	50,95	44,0	39,61	0,6	11,34
	Бежевый	2	45,16	51,02	44,0	54,33	1,16	-3,31
	Без протектора			43,5	50,45	14	52,43	-0,5
2,5 МГц/ 70°	Серый	0,5	15,15	42,6	14	38,33	1,15	4,27
	Серый	1	14,6	41	14	40,65	0,6	0,35
	Синий	2	13,95	39,3	14	43,08	-0,05	-3,78
	Бежевый	2	14,5	40,49	14	38,33	0,5	2,16
	Без протектора			14,35	40,42	14	36,47	0,35
2,5 МГц/ 65°	Серый	0,5	14,4	30	14	30,02	0,4	-0,02
	Серый	1	14,2	30,3	14	30,02	0,2	0,28
	Синий	2	14,2	30,4	14	31,44	0,2	-1,04
	Бежевый	2	14,5	30,35	14	31,44	0,5	-1,09
	Без протектора			13,56	29,8	14	31,44	-0,44
5 МГц/ 70°	Серый	0,5	15,37	42,23	14	43,08	1,37	-0,85
	Серый	1	14,5	40,08	14	39,53	0,5	0,55
	Синий	2	14,2	38,9	14	39,53	0,2	-0,63
	Бежевый	2	15,18	41,7	14	40,65	1,18	1,05
	Без протектора			14,33	39,38	14	43,08	0,33

Заключение. Усовершенствована теоретическая модель акустического тракта для ультразвукового контроля сварных швов труб малого диаметра с использованием съемных печатных протекторов для наклонных преобразователей, учитывающая влияние изменения: эффективного угла ввода ультразвукового луча; расстояния от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча; затухания в протекторе (изменение длины хода луча по призме); коэффициента прозрачности по энергии на границах призма – протектор – объект.

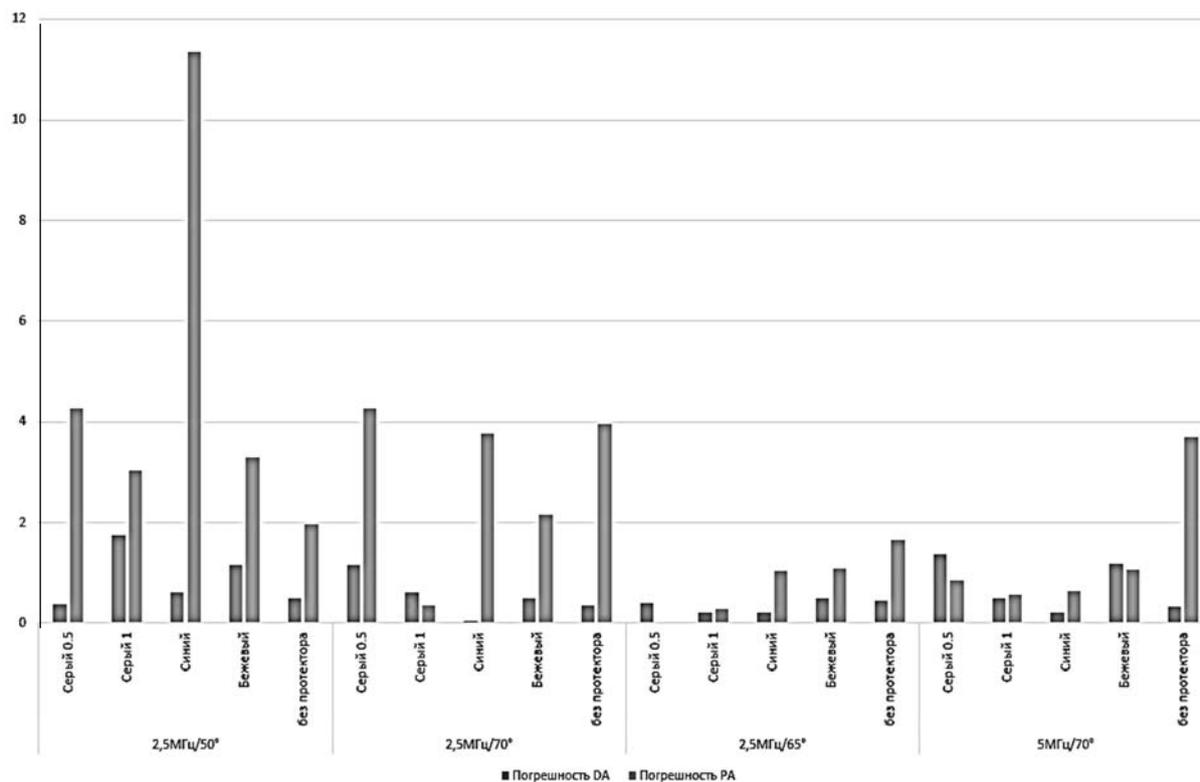


Рис. 6. Гистограмма значений погрешностей измерений для каждого из преобразователей

Получены амплитудные зависимости (АРД-диаграммы) эхосигналов для поперечных волн, трансформированных из продольной волны, для различных искусственных ненаправленных отражателей, которые позволили сформировать методику настройки прибора с использованием протекторов из различных материалов при контроле сварных швов труб, учитывающие влияние всех вышеперечисленных дестабилизирующих факторов и обеспечивающие равномерность чувствительности при сканировании объекта, что в целом способствует повышению достоверности и производительности контроля реальных объектов.

Экспериментально проверено влияние используемых протекторов на величину погрешности измерения местоположения и размеров дефектов по искусственным ненаправленным отражателям для преобразователей с различными углами ввода на частотах 2,5 и 5 МГц. Получены значения абсолютных погрешностей определения координат дефектов.

По результатам исследований предложены некоторые практические рекомендации:

- при использовании протекторов с толщиной контактного слоя более 1 мм наблюдается заметное изменение стрелы и угла ввода;

– в среднем при использовании протекторов задержка увеличивается на 1...3 мкс, что необходимо учитывать для получения точных результатов;

– существенное влияние на амплитуду эхосигналов оказывает шероховатость поверхности контролируемых образцов и контактной поверхности самого протектора, поэтому после печати протектора на 3D-принтере его контактную поверхность необходимо зачистить мелкодисперсной наждачной бумагой;

– для контроля реальных объектов целесообразно применять протекторы с притиркой минимальной толщины для уменьшения задержки, но не менее 0,5 мм, т. к. слишком тонкий протектор имеет малую износостойкость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гордеева, А. С.** Исследование эффективности наклонных пьезопреобразователей со сменными протекторами / А. С. Гордеева, А. В. Сергеев, С. С. Сергеев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – 513 с.

2. **Ермолов, Б. В.** Исследование эффективности наклонных пьезопреобразователей со сменными протекторами / Б. В. Ермолов, М. Е. Плотников, А. С. Гордеева // 57 студенч. науч.-техн. конф. Беларус.-Рос. ун-та: материалы конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – 216 с.

E-mail: llanyalllanyalll@mail.ru, sss.bru@tut.by.

УДК 681.7

**ПНЕВМООПТОЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО БЕСКОНТАКНОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРА ВАЛА
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

В. В. ИВАНОВ, В. Ф. ГОГОЛИНСКИЙ, А. А. АФАНАСЬЕВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 681.7

**PNEUMOOPTOELECTRONIC DEVICE FOR NON-CONTACT
TECHNOLOGICAL CONTROL OF ELECTRIC MOTOR SHAFT
DIAMETER**

V. V. IVANOV, V. F. GOGOLINSKY, A. A. AFANASIEV

Аннотация. Разработаны конструкции пневмодатчика, растрового инкрементного фотоэлектрического преобразователя, электронного блока, являющиеся компонентами пневмооптоэлектронного устройства для бесконтактного технологического размерного контроля диаметров валов электродвигателей в процессе их изготовления.

Ключевые слова: вал ротора электродвигателя, измерение диаметра, пневмодатчик, растровый инкрементный фотоэлектрический преобразователь, электронный блок.

Abstract. The designs of a pneumatic sensor, a raster incremental photoelectric converter, an electronic unit, which are components of a pneumo-optoelectronic device for non-contact technological dimensional control of the diameters of the shafts of electric motors during their manufacture, have been developed.

Keywords: electric motor rotor shaft, diameter measurement, pneumatic sensor, raster incremental photoelectric converter, electronic unit.

Объектом контроля является вал ротора электродвигателя. Необходимо проводить контроль, который позволяет при шлифовании вала достигать заданных размеров (рис. 1). На автоматической линии ротор проходит несколько стадий механической обработки на трех станках.

На первой стадии проводится шлифовка шейки вала под подшипник, вентилятор и под сальник. Размеры вала под подшипник – $\varnothing 30 \pm 0,105$ мм; под сальник – $\varnothing 30 - 0,065$ мм; под вентилятор – $\varnothing 29 - 0,023$ мм.

На второй стадии проходит обработка вала под подшипник, под сальник и под шкиф. Размеры: под подшипник – $\varnothing 30 \pm 0,105$ мм; под сальник – $\varnothing 30 - 0,065$ мм; под шкиф – $\varnothing 28 \pm 0,009$ мм. Эти размеры контролируются жесткими измерителями – стандартными скобами.

На третьей стадии деталь поступает на круглошлифовальный станок. В процессе шлифования осуществляется переключение скорости подачи круга с предварительного на чистое шлифование и далее на сверхчистое шлифование. При обработке вал уменьшается в диаметре. При достижении диаметра вала

требуемого размера измерительное устройство фиксирует значение и отключает станок.

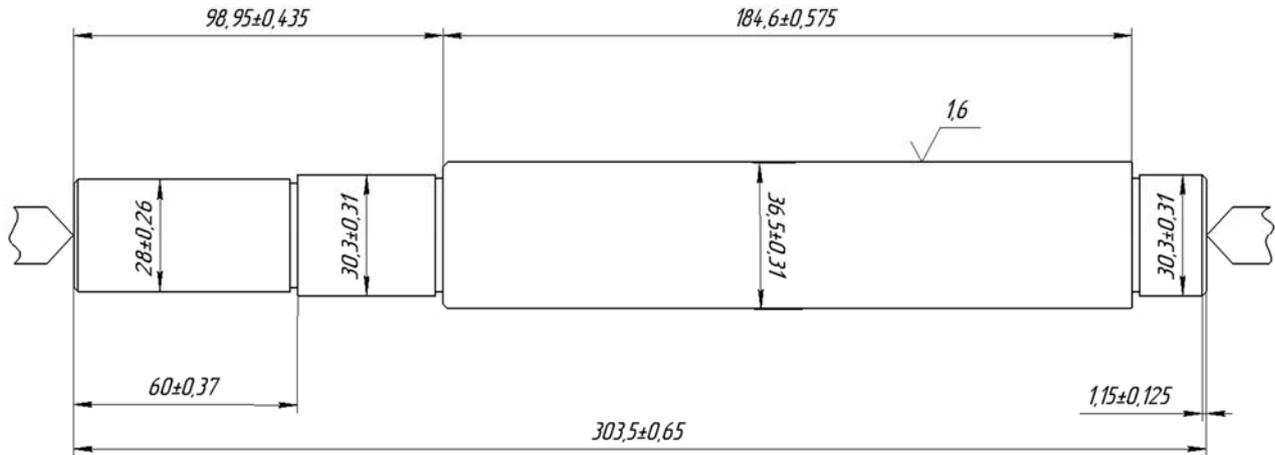


Рис. 1. Вал ротора электродвигателя

Для бесконтактного непрерывного технологического измерения диаметра вала ротора электродвигателя в качестве первичного измерительного преобразователя был изготовлен пневмодатчик, в котором используется принцип уравновешенного преобразования, обеспечивающий высокие метрологические и эксплуатационные характеристики при измерении линейных размеров объектов (рис. 2) [1].

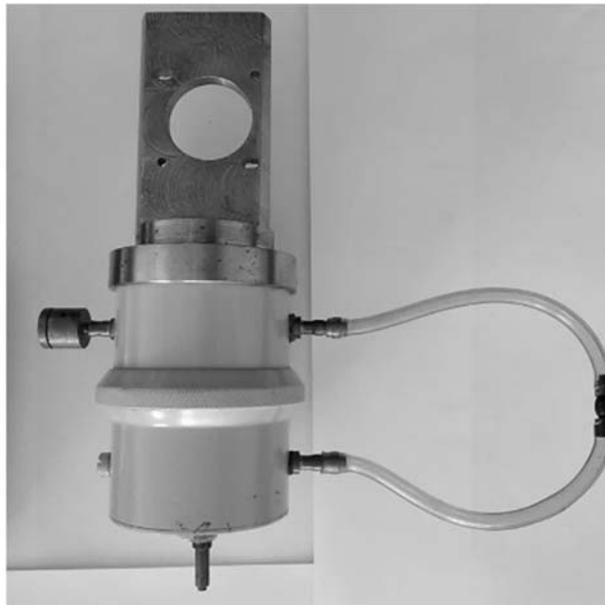


Рис. 2. Внешний вид пневмодатчика для измерения линейных размеров объектов

Пневматические преобразователи линейных размеров получили широкое распространение в машиностроении, авиастроении и других отраслях

промышленности. Сравнительно недорогие и простые в эксплуатации они обеспечивают высокую точность контроля, бесконтактность измерений, контроль в труднодоступных местах, контроль с малым измерительным усилием. Отмеченные достоинства пневматических преобразователей являются крайне важными для многих предприятий, перед которыми стоит проблема оснащения действующего производства средствами измерений.

Контролируемый параметр (диаметр вала электродвигателя) и перемещение подвижного элемента пневмодатчика (штока) являются аналоговыми величинами и для их преобразования в цифровые необходимы специальные преобразователи. Из применяемых различных типов аналого-цифровых преобразователей распространение получили преобразователи, принцип работы которых основан на преобразовании измерительной информации с помощью оптико-электронных средств [2].

Для получения цифрового информационного электрического сигнала был разработан растровый инкрементный фотоэлектрический преобразователь (РИФП), состоящий из стеклянных линеек (подвижной и стационарной) с нанесенными на них темными полосками (растром), источника излучения и четырех фотоприемников (рис. 3).

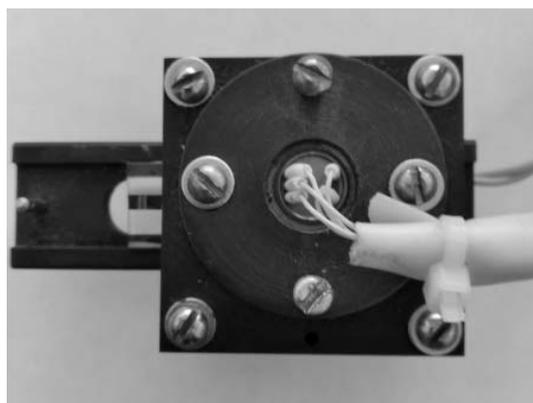


Рис. 3. Растровый инкрементный фотоэлектрический преобразователь

Для практической реализации устройства были разработаны структурные схемы РИФП и электронного блока (ЭБ), выполняющего обработку и представление измерительной информации в удобном для восприятия пользователем виде (рис. 4).

Стационарная растровая линейка (СРЛ) и подвижная растровая линейка (ПРЛ) выполняют роль модулятора интенсивности излучения. Свет от источника излучения (ИИ) сначала попадает на решетку СРЛ, которая пропускает на ПРЛ только 50 % излучения. Когда непрозрачные полосы решетки ПРЛ точно совмещаются с пропускающими зонами решетки СРЛ, путь свету будет полностью перекрыт. Такая комбинация решеток, нанесенных на линейки, позволяет модулировать интенсивность прошедшего через них и направленного на фотоприемники ФП1–ФП4 излучения от 0 % до 50 % первоначальной его интенсивности.

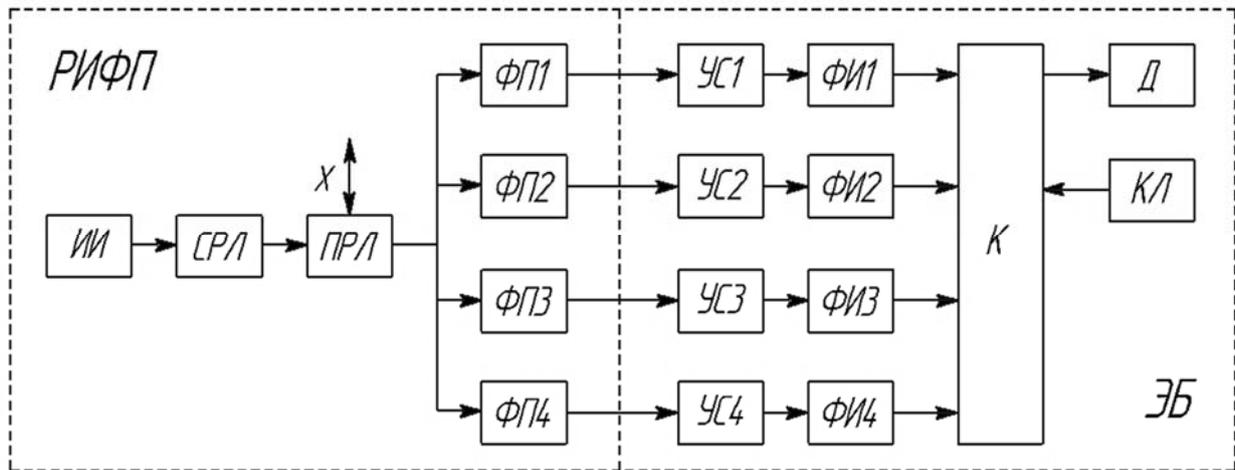


Рис. 4. Структурные схемы растрового инкрементного фотоэлектрического преобразователя и электронного блока

Сигналы с выходов фотоприемников усиливаются усилителями УС1–УС4 и преобразуются в прямоугольные импульсы с помощью формирователей ФИ1–ФИ4. С выходов формирователей последовательности прямоугольных импульсов поступают в контроллер (К), в котором программно извлекается содержащаяся в них информация о величине перемещения X ПРЛ и, соответственно, о контролируемом параметре – диаметре вала. Результат измерения выводится на дисплей (Д). Управление работой устройства осуществляется с помощью клавиатуры (КЛ).

На передней панели корпуса ЭБ расположены дисплей из светодиодных семисегментных индикаторов, кнопки переключения диапазона измерения, сброса, включения режима измерения. На боковой панели предусмотрены разъемы для подключения источника питания и растрового фотоэлектрического преобразователя (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид электронного блока

Внешний вид пневмооптоэлектронного устройства для измерения диаметра вала показан на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид пневмооптоэлектронного устройства для измерения диаметра вала

Подвижная растровая линейка жестко крепится к штоку пневмодатчика. Перемещение штока передается СРЛ, в результате чего происходит модуляция потока излучения, направленного через линейки к фотоприемникам, и формирование на их выходах электрических сигналов, из которых формируются далее последовательности прямоугольных импульсов, подсчитываемые электронным счетчиком, встроенным в контроллер. По количеству подсчитанных импульсов программно вычисляется длина перемещения ПРЛ и, соответственно, штока пневмодатчика, взаимодействующего с валом ротора электродвигателя. Результат измерения может быть представлен как в виде абсолютного значения измеряемой величины, так и в виде отклонения от нормированного значения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ бесконтактного контроля профиля изделия и устройство для его осуществления: пат. ВУ 12407 / Е. И. Марукович, А. П. Марков, А. В. Коннов, В. Ф. Гоголинский, А. А. Александрович. – Оpubл. 30.06.2009.
2. Фотоэлектрические преобразователи информации / Л. Н. Преснухин [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1974. – 376 с.

УДК 004.946:37.02:620.179.152

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАДИОГРАФИЧЕСКОМУ МЕТОДУ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Е. Е. КОВШОВ, В. С. КУВШИННИКОВ

АО «НИКИМТ – Атомстрой» (Госкорпорация «Росатом»)

Москва, Россия

UDC 004.946:37.02:620.179.152

APPLICATION OF MODERN COMPUTER TECHNOLOGIES IN TRAINING OF RADIOGRAPHIC METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING SPECIALISTS

E. E. KOVSHOV, V. S. KUVSHINNIKOV

Аннотация. Затрагивается проблема практического применения программных решений на основе технологии виртуальной реальности при подготовке, переподготовке и повышении квалификации отраслевых специалистов по неразрушающему контролю. Представлен комплексный мультикомпонентный подход к созданию обучающей среды. Рассмотрены основные составляющие, их цели и задачи. Приведены структура курса и иллюстрации тренировочного процесса в виртуальной среде. Перечислены основные направления развития и масштабирования решения.

Ключевые слова: электронное обучение, виртуальная реальность, цифровые и информационные технологии, программный симулятор, рентгеновское изображение.

Abstract. The article concerns the application of virtual reality software solutions in nondestructive testing industry specialists training, retraining and advanced training. A complex multicomponent method to develop a training environment is presented. The key elements, their objectives and goals are reviewed. The course structure and examples of the training process in a virtual environment are provided. The main trends of development and scaling of the solution are outlined.

Keywords: virtual reality, e-learning, digital and information technologies, x-ray image, software simulator.

Введение. В настоящее время вычислительная техника надёжно зарекомендовала себя как полезный инструмент в образовании. Мировая практика показывает, что применение информационных технологий актуально в обучении персонала как в профессиях, связанных с общением с людьми [1], так и в профессиях, требующих выполнения монотонных операций [2] и связанных с умным производством [3]. Цифровые тренажеры на основе виртуальной и дополненной реальности позволяют расширить перечень решаемых при обучении задач и качество усвоения материала, задействуя зрительную, слуховую (аудиальную) и двигательную (моторную) память. Таким образом, просматривается потенциал применения VR- и AR-технологий в программе подготовки технических специалистов для специальностей, сопряженных с опасностью и высокими требованиями к профессионализму сотрудников.

Обучение неразрушающему контролю. Неразрушающий контроль (НК) играет важную роль в современном промышленном комплексе. В настоящий момент технологии неразрушающего контроля активно модернизируются и обновляются в рамках концепции NDT 4.0 [4]. Совершенствование технического оснащения специалистов не может происходить отдельно от усовершенствований в программах подготовки и переподготовки. Ранее выделен целый ряд недостатков широко распространённого аудиторного метода обучения НК [5]. В ходе обучения и контроля знаний, как правило, используются выполненные в материале образцы и действующее оборудование.

Радиационный контроль (РК) – один из самых распространённых видов неразрушающего контроля в атомной энергетике. Атомная отрасль сохраняет высокий уровень потребности в специалистах РК, но создание, оснащение, лицензирование и поддержание РГ-лаборатории – сложный и дорогостоящий процесс. Взамен традиционному обучению предлагается комплексное решение, составляющее цифровую образовательную среду или DEE (Digital Educational Environment) [6]. DEE должна включать как учебные программы, методические материалы и теоретические занятия в рамках платформы LMS (Learning Management System), так и использование тренажеров виртуальной реальности для наработки и укрепления ряда практических навыков и знаний. К настоящему моменту на рынке существует большой ряд конкурентоспособных LMS-платформ, пригодных для обучения как гуманитарным, так и техническим дисциплинам [7]. Многие организации стремятся разработать собственную цифровую образовательную среду, но это увеличивает расходы и негативно сказывается на качестве результата, а также приводит к ограниченности доступных возможностей, предлагаемых индустрией e-learning [8].

Теоретическая часть. Как упоминалось ранее, важную часть цифровой образовательной среды, предназначенной для обучения, переподготовки и повышения квалификации специалистов по неразрушающему контролю, составляет LMS-платформа. Среди её задач – обеспечение учащихся и преподавателей возможностью удалённого круглосуточного доступа к материалам, занятиям и сервисам. Цифровая трансформация образовательного процесса требует переработки учебных планов и программ. В ходе исследования, проведённого коллективом специалистов, разработаны соответствующие методические материалы. В соответствии с разработанным планом занятий, при подготовке к аттестации по РГ, десять лекций из двадцати охватывают материал, достаточный для успешной сдачи теоретического экзамена. Из оставшихся десяти лекций, посвященных практике, семь включают работу с VR-тренажёром: ознакомление с техникой, демонстрацию объектов контроля и вспомогательного инвентаря, самостоятельное выполнение тренировочных заданий.

Практическая часть. Одной из задач при разработке тренажёра была задача создания возможности с помощью сравнительно недорогого оборудования проводить местную практику в локально оборудованном помещении. При этом в полной мере могут быть оценены такие важные пункты, как: соблюдение корректной и безопасной последовательности действий при выполнении контроля; корректный выбор индикаторов и маркеров; верный выбор схемы

контроля объекта; корректное размещение и позиционирование как объекта контроля, так и РГ-аппарата; соблюдение требований правил безопасности при работе с излучателями ионизирующего излучения; контроль соблюдения требований к срокам поверки оборудования; другие пункты, влияющие на эффективность и безопасность труда, а также успешное прохождения аттестации.

Практическое занятие в виртуальной лаборатории проходит в несколько этапов. Пример структуры занятия приведён на рис. 1.

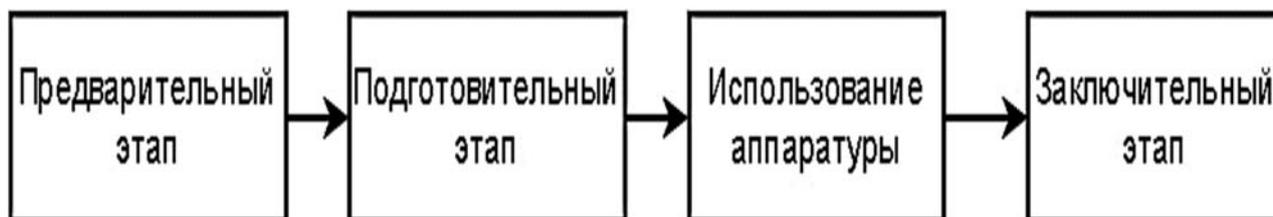


Рис. 1. Этапы практического занятия

На предварительном этапе составляется новая или изучается ранее составленная технологическая карта, осуществляется выбор образца, РГ-аппарата, схемы контроля объекта (рис. 2) [5].



Рис. 2. Выбор контролируемого образца

Подготовительный этап включает определение параметров экспозиции, среди которых напряжение, ток анода и продолжительность экспозиции. Также вручную (с задействованием двигательной памяти) проводится размещение виртуального объекта контроля, маркеров и индикаторов, настройка штатива РГ-аппарата (рис. 3) [5]. В ходе подготовительного этапа обучаемый демонстрирует свои знания теории и практики обращения с документацией по контролируемому объекту и РГ-аппарату, умение подобрать сочетание параметров и всецело настроить экспозицию в соответствии со схемой контроля.

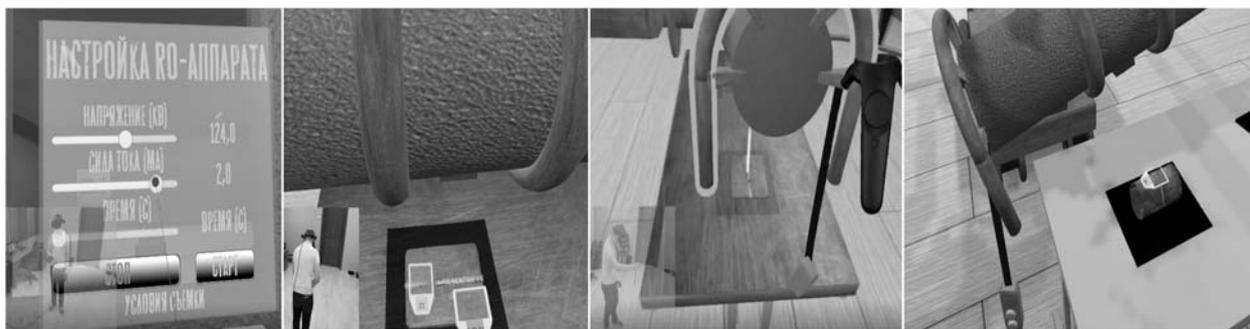


Рис. 3. Настройка экспозиции

В ходе следующего этапа проводится экспозиция, а также выбирается режим обработки плёнки в случае её применения. При этом проверяется соблюдение техники безопасности при работе с опасными объектами (рис. 4) [9].



Рис. 4. Индикаторы соблюдения требований безопасности

На заключительном этапе проверяется качество снимка с применением негатоскопа и денситометра, проводится расшифровка результатов. При контроле качества снимка особое внимание уделяется контрастности полученного изображения, показателям оптической плотности на участках расчётной контролируемой толщины образца, а также общей различающей способности полученного снимка. Ошибка в составлении технологической карты, выборе схемы контроля или в настройке параметров экспозиции проявляется на данном этапе.

Для того чтобы ученик получил представление о последствиях распространённых ошибок, VR-тренажёр оснащён функцией симуляции реалистичных радиографических снимков (рис. 5).

Формирование изображения производится на основе физически достоверных закономерностей средствами графического движка с использованием программ-шейдеров. В результате поэтапной обработки вершин и фрагментов изображения осуществляется оценка интенсивности прошедшего излучения по формуле

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu\delta},$$

где I , I_0 – выходная и начальная интенсивности РГ-излучения; e – число Непера; μ – линейный коэффициент поглощения материала; δ – толщина материала [9].

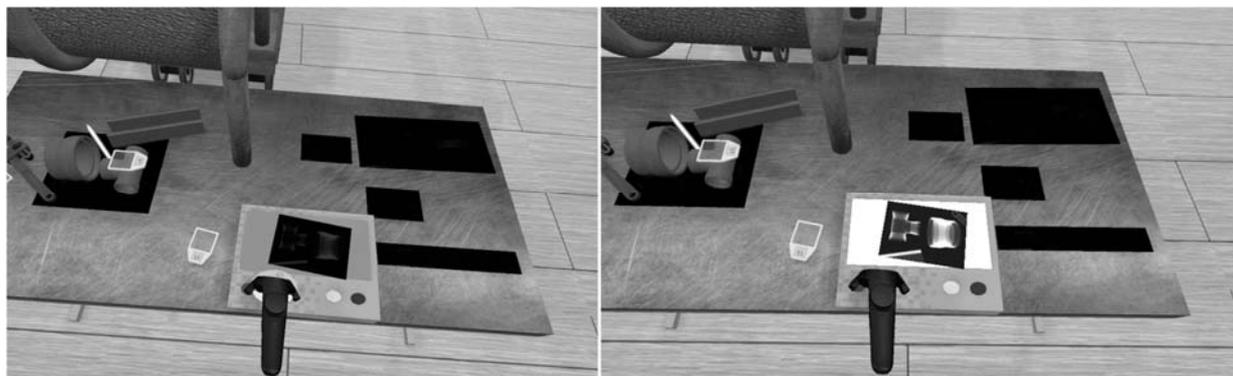


Рис. 5. Симуляция получения радиографического изображения

Доза, поглощенная чувствительными зернами пленки или пикселями цифрового плоскостового детектора, рассчитывается с использованием ранее рассчитанной интенсивности:

$$E = I \cdot t \cdot F_N^2 / F^2 ,$$

где t – продолжительность экспозиции; F_N – номинальное фокусное расстояние; F – фактическое фокусное расстояние [9].

По оценочной поглощенной дозе на участке носителя изображения определяется яркость для цифровых плоскостовых детекторов или величина полученной оптической плотности для плёнки:

$$D = k / (1 + e^{-\lg(E) \cdot a}) + b ,$$

где D – оптическая плотность; k – коэффициент поглощения плёнки; E – уточнённая экспозиция; a – коэффициент контрастности плёнки; b – коэффициент чувствительности плёнки [9].

Благодаря используемой технологии, это позволяет предоставить студентам в первом приближении правдоподобный опыт проверки качества снимков, осуществляемой путем оценки различимости изображений проволоочных (рис. 6) или канавочных индикаторов чувствительности.

На рис. 6 показано влияние настроек РГ-аппарата на качество получаемого изображения. Представлены образцы стыковых сварных соединений двух типов: плоские и трубные. Напряжение, анодный ток и длительность экспозиции устанавливаются в соответствии с номограммой и параметрами технологической карты аппарата для следующих случаев: рекомендуемое напряжение (см. рис. 6, а), нижний предел напряжения (см. рис. 6, б), верхний предел напряжения (см. рис. 6, в).

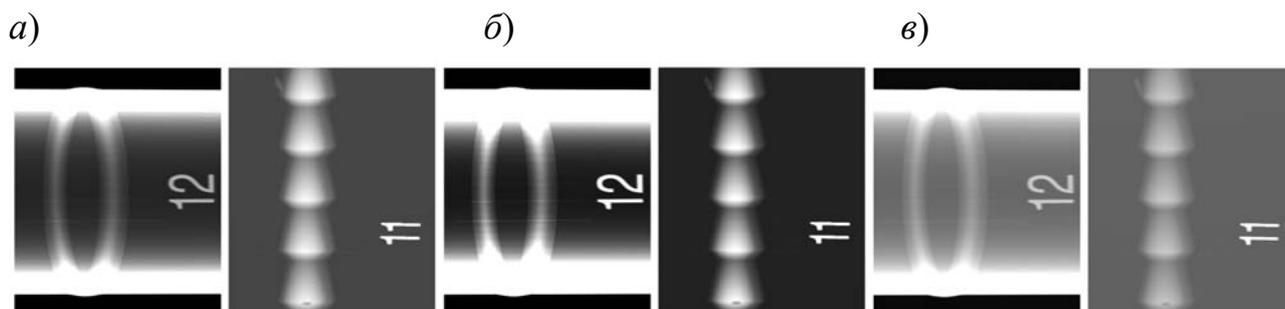


Рис. 6. Смоделированный радиографический снимок с проволочными индикаторами чувствительности

Заключение. Совокупность цифровых средств удалённого и виртуального обучения позволят сократить временные и материальные затраты на обучение и переобучение специалистов, значительно снизить радиационную опасность на ранних этапах практических занятий, упростить организацию учебных и тренировочных классов. Вышеперечисленное позволит повысить средний уровень подготовки специалистов и обеспечить промышленность достаточным количеством кадров в условиях наращивания объёмом заказов. Практическая полезность разработки цифровой образовательной среды раскрывается благодаря переносу и масштабированию полученного решения на другие виды и методы неразрушающего контроля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brown, K.** Innovation in the Learning Management System (LMS): Design Elements for Retail Industry Training / K. Brown // Research Anthology on Business and Technical Education in the Information Era. – IGI Global, 2021. – P. 375–402.
2. E-learning for a Boring Process at an Aerospace Industry Company / D. Dindana [et al.] // 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). – IEEE, 2020. – P. 256–260.
3. E-learning and industry 4.0: A chatbot for training employees / F. Clarizia [et al.] // Proceedings of Fifth International Congress on Information and Communication Technology. – Springer, Singapore, 2021. – P. 445–453.
4. **Saboonchi, H.** Advancements in radiographic evaluation through the migration into NDE 4.0 / H. Saboonchi, D. Blanchette, K. Hayes // Journal of nondestructive evaluation. – 2021. – Vol. 40, № 1. – P. 1–12.
5. **Kovshov, E. E.** Virtual reality as a tool for training specialists in the field of radiation non-destructive testing / E. E. Kovshov, V. S. Kuvshinnikov // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk. – 2021. – P. 32007.
6. Способ обучения неразрушающему контролю: пат. ВУ 2767087 / Е. Е. Ковшов, Д. Ф. Казаков, В. С. Кувшинников. – Опубл. 16.03.2022.
7. **Исаева, Е. С.** Современные LMS-платформы дистанционного обучения: анализ и сравнение / Е. С. Исаева // Педагогика. Вопросы теории и практики. – 2021. – Т. 6, № 6. – С. 1045–1050.
8. **Aleksandrova, L. A.** Digital Learning Platform Services / L. A. Aleksandrova, E. R. Galimov // Computer tools in education. – 2019. – № 1. – P. 79–87.
9. **Ковшов, Е. Е.** Формирование рентгеновского изображения объекта неразрушающего контроля в среде виртуальной реальности / Е. Е. Ковшов, В. С. Кувшинников, Д. Ф. Казаков // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 8 (278). – С. 14–22.

УДК 691.113, 624.048, 674.051

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРЛЕНИЮ НА НЕКОТОРЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ (*Pinus sylvestris* L.)

A. С. КОРОЛЕВ, Е. С. ШАРАПОВ, С. В. ШЛЫЧКОВ

Поволжский государственный технологический университет
Йошкар-Ола, Россия

UDC 691.113, 624.048, 674.051

EFFECT OF DRILING RESISTENS MEASUREMENTS ON SOME RESIDUAL STRENGTH PROPERTIES OF SCOTS PINE (*Pinus sylvestris* L.)

A. S. KOROLEV, E. S. SHARAPOV, S. V. SHLICHKOV

Аннотация. Метод измерения сопротивления сверлению активно внедряется в область неразрушающего контроля физико-механических свойств и внутреннего состояния древесины, элементов деревянных конструкций. Вместе с тем отверстия диаметром 3 мм в материале могут оказывать значительное влияние на прочностные и эксплуатационные характеристики элементов конструкций. На основании конечно-элементного моделирования и проведенных испытаний образцов древесины сосны на статический изгиб и сжатие рекомендуется использовать метод измерения сопротивления сверлению для оценки качества конструкционного материала, находящегося под изгибающей нагрузкой, в нейтральном слое или по направлению внешней изгибающей нагрузки. Результативность программного моделирования для прогнозирования разрушения деревянных балок с отверстиями ограничено ввиду концентрации напряжений вокруг отверстий. Влияние отверстий на прочность элементов деревянных конструкций, работающих на сжатие, незначительно и пропорционально уменьшению поперечного сечения образца.

Ключевые слова: обследование зданий и сооружений из древесины, неразрушающая диагностика, моделирование свойств древесины, статический изгиб, сжатие.

Abstract. The drilling resistance (DR) measurement method is used extensively for nondestructive testing and evaluation of physical, mechanical properties and internal condition of wood and structural timber. At the same time, holes with a diameter of 3 mm in the material can have a significant impact on the residual strength and service conditions of structural timber elements. Scots pine specimens with holes (after DR measurements) were simulated and tested in static bending and compression. DR measurements had negligible effect when applied in neutral layers or in the direction of the external bending load. Application of the software simulation for prediction strength properties of wooden elements with holes is limited due to the stress concentration around the holes. Effect of holes on residual compression strength was minor and proportional to the cross-section loss.

Keywords: in-situ assessment of structural timber, nondestructive testing and evaluation, wood behavior simulation, wood bending, wood compression.

Введение. Одним из распространенных на сегодняшний день неразрушающих методов определения свойств и внутреннего состояния древесины в деревянных строительных конструкциях является метод измерения сопротивления сверлению [3, 5, 6, 9]. Метод основан на определении необходимой мощности для просверливания древесины с помощью мобильных устройств, оснащенных тонкими буровыми сверлами диаметром 3 мм. Ведущие позиции на

рынке по продажам устройств данного типа занимают две германские компании: IML System GmbH (рис. 1, а) и Rinntech-Metriwerk GmbH & Co (рис. 1, б).

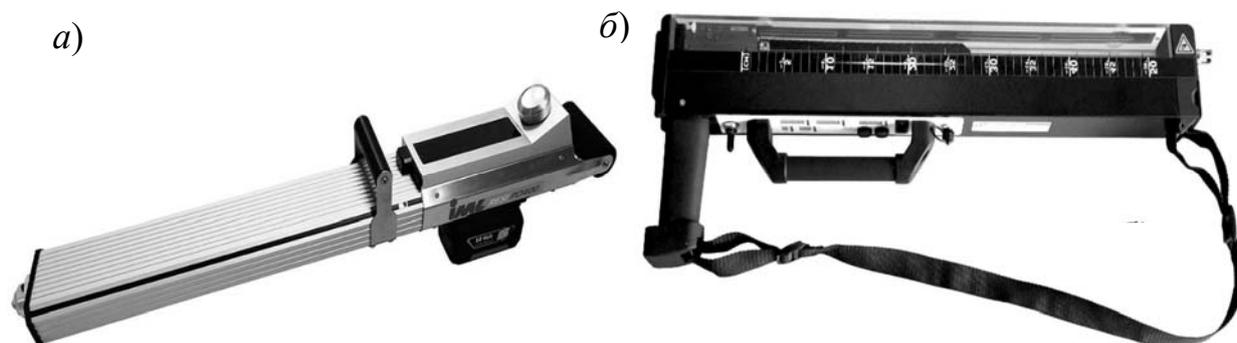


Рис. 1. Устройства для измерения сопротивления сверления древесины: IML-Resi PD 400 (<https://www.iml.de/>) и Resistograph R650 (<http://rinntech.de/>)

После проведения измерений в древесине остаются отверстия, являющиеся концентраторами напряжений [4], которые могут оказывать значимое влияние на несущую способность элементов деревянных строительных конструкций. Следует отметить, что современные деревянные здания и сооружения проектируются с учетом прокладки необходимых инженерных коммуникаций в элементах конструкций [7]. Размеры, формы и расположение отверстий при этом регламентируются отечественными и международными стандартами и сводами правил, такими как DIN 1052:2004–08, DIN EN 1995-1-1/NA:2010, СП 31-105–2002. Вместе с тем отмеченные в нормативных документах рекомендации не касаются отверстий незначительного диаметра, образующихся в результате использования метода измерения сопротивления сверлению.

Целью данного исследования являлось определение влияния отверстий при использовании метода измерения сопротивления сверлению на прочностные характеристики древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) при статическом изгибе и сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была выбрана древесина сосны, которая является основным строительным материалом для возведения несущих каркасов, межэтажных перекрытий, стропильных систем крыш, а также изготовления клееных деревянных конструкций и материалов на основе древесины (OSB, LVL, CLT и др.).

Для определения влияния отверстий на прочность при статическом изгибе и условной прочности при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении изготавливались образцы с применением метода систематического отбора по ГОСТ 16483.0–89. Для испытаний на статический изгиб были подготовлены образцы размерами $20 \times 20 \times 300$ мм³, $30 \times 30 \times 420$ мм³, $40 \times 40 \times 600$ мм³, $50 \times 50 \times 750$ мм³. Площадь поперечного сечения, длина и схема нагружения образцов выбраны в соответствии с ГОСТ 16483.3–84 и ГОСТ 33120–2014 и представлены на рис. 2, а. Перед проведением испытаний образцы выдерживались при температуре (20 ± 2) °С и относительной влажности (30 ± 2) % до достижения равновесной влажности, составляющей 8 %.

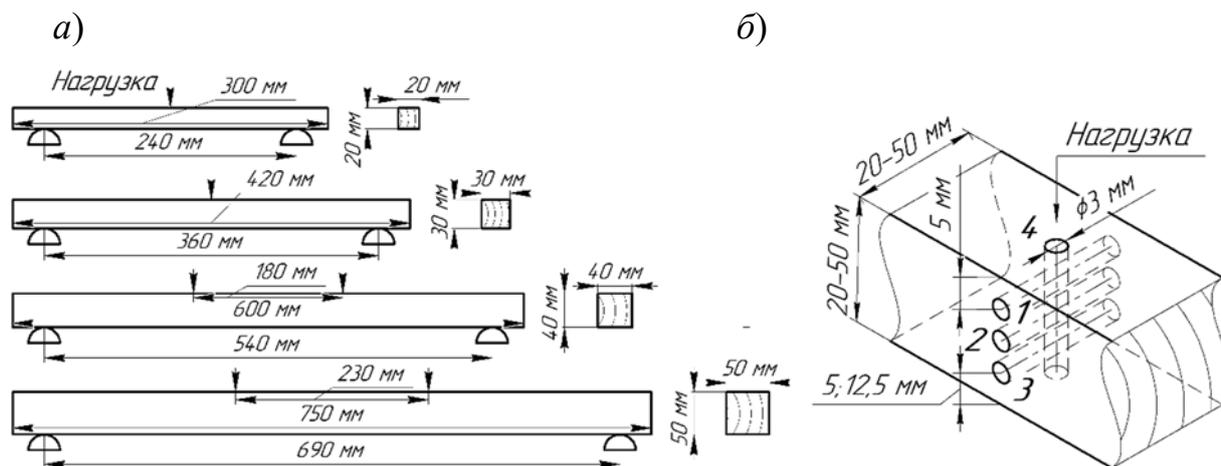


Рис. 2. Геометрические параметры и схемы нагружения образцов (а) и схема положения отверстий (б): 1–3 – отверстия в сжатой, нейтральной и растянутой зонах волокон образца соответственно; 4 – отверстие в направлении действия изгибающей нагрузки

Предварительно образцы были отсортированы на группы в соответствии с плотностью древесины или по количеству годичных слоев. С помощью устройства IML-Resi PD 400 в образцах были просверлены отверстия согласно эскизу, представленному на рис. 2, б.

Отдельной серией проводились испытания древесины сосны на сжатие

поперек волокон в тангенциальном направлении. Для этого были изготовлены и испытаны образцы сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 30 мм по ГОСТ 16483.11–72, которые в дальнейшем были отсортированы (с учетом вариации плотности) на четыре группы: без отверстий, с одним отверстием, двумя и тремя отверстиями (рис. 3).

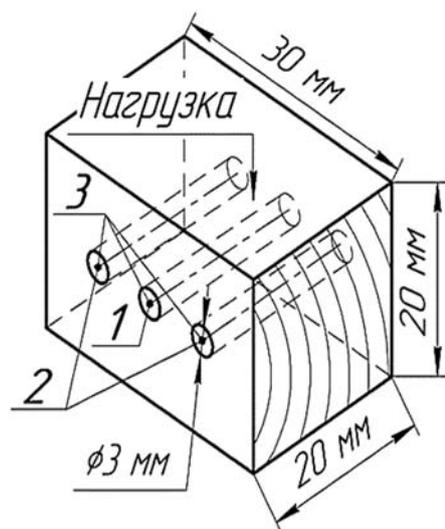


Рис. 3. Образцы для испытаний на сжатие

Для оценки прочности древесины сосны при статическом изгибе и сжатии поперек волокон использовались универсальные испытательные машины IG-IC 50kN (Shimadzu Corp., Япония) и Р-10 (ЗИМ, СССР). Определение достоверности различий между групповыми средними максимальной нагрузки проводили с помощью теста Тьюки (Tukey HSD) с доверительной вероятностью 95 %.

Моделирование изгиба образцов. Исследование напряженно-деформированного состояния образцов при статическом изгибе проводилось с помощью метода конечных элементов (КЭ). В программном комплексе *Ansys* (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) были построены дискретные модели, насчитываю-

щие 30000 КЭ (SOLID186). Данные КЭ удобно применять для моделирования материалов с учетом физической нелинейности, которая проявляется при больших нагрузках и деформациях. Именно таким образом ведет себя древесина сосны [2]. Для описания ее упругих свойств использована модель ортотропного тела [1], а для отражения нелинейности – опция «билинейного изотропного упрочнения», которая требует введения дополнительного модуля упругости, позволяющего учитывать нелинейное поведение материала при возрастающих нагрузках. Этот параметр был определен на основании результатов поставленных экспериментов.

Разрушение образца без отверстий при статическом изгибе можно спрогнозировать по максимальным растягивающим напряжениям [8]. Однако наличие в нем отверстия приводит к возникновению неоднородного напряженного состояния и концентрации напряжений. Это затрудняет возможность точного прогнозирования нагрузки, при которой произойдет разрушение образца. Распределение нормальных и касательных напряжений в образце с отверстием в зоне растянутых волокон представлено на рис. 4.

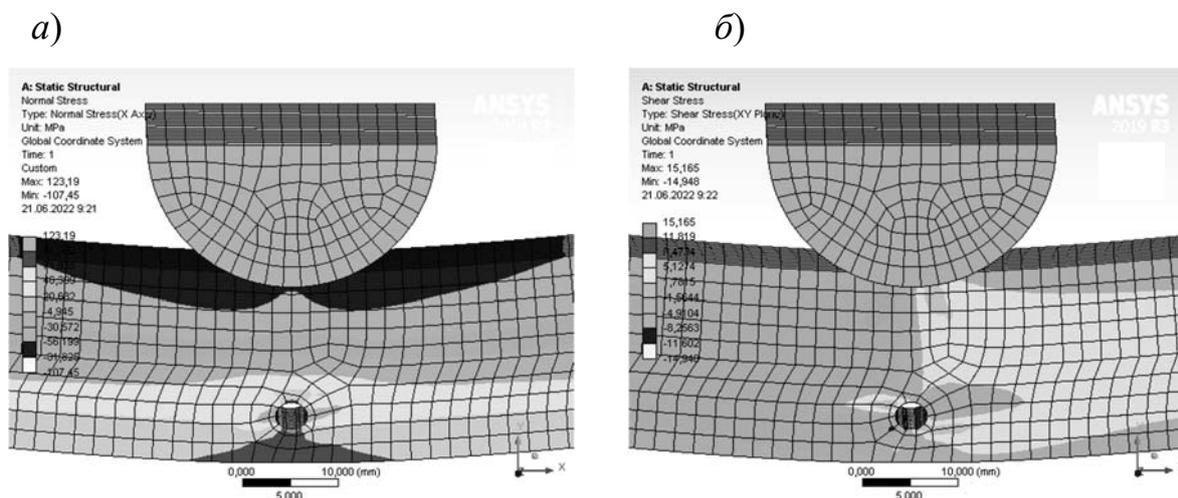


Рис. 4. Поля нормальных (а) и касательных (б) напряжений в образце сечением $20 \times 20 \text{ мм}^2$ с отверстием в зоне растянутых волокон на примере разработанной КЭ-модели в программном комплексе *Ansys*

Результаты экспериментов. Примеры результатов экспериментальных зависимостей усилий от прогиба и деформации при статическом изгибе и сжатии образцов с одним отверстием приведены на рис. 5.

Обобщенные результаты исследований, включающие геометрические размеры и количество образцов, расположение отверстий (см. рис. 2, б), максимальную силу разрушения образца P_{\max} и однородность групп по средней P_{\max} для испытаний при статическом изгибе, представлены в табл. 1, при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении – в табл. 2. Однородность средних значений P_{\max} образцов обозначена знаком X в соответствующем столбце табл. 1 и 2.

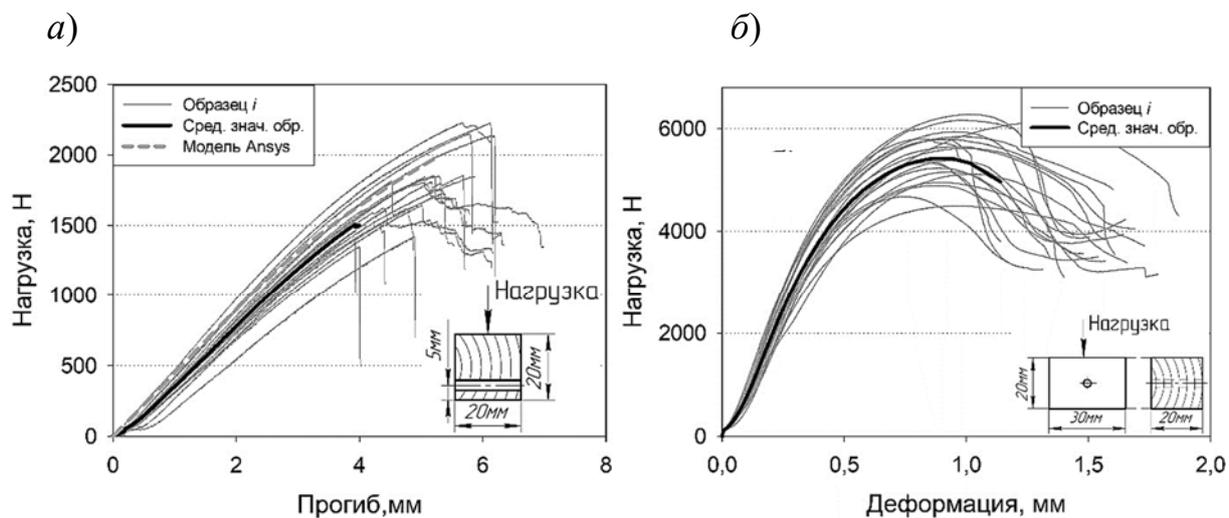


Рис. 5. Выборочные диаграммы «нагрузка – прогиб» при статическом изгибе образца с отверстием в зоне растянутых волокон с разработанной моделью в *Ansys* (а), диаграмма «нагрузка – деформация» образцов с одним отверстием при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении (б)

Табл. 1. Обобщенные результаты испытаний образцов на статический изгиб

$B \times Ш \times Д, \text{ мм}^3$	Количество образцов	Расположение отверстия	P_{\max} (среднее/ст. откл./коэффициент вар.), H	Однородность групп
$20 \times 20 \times 300$	18	Без отв.	2129/175/8,2	X
	18	1	1768/146/8,3	X
	18	2	2081/114/5,5	X
	18	3	1798/268/14,9	X
	18	4	1800/160/8,9	X
$30 \times 30 \times 420$	20	Без отв.	3824/581/15,2	X
	20	1	3530/427/12,1	XX
	20	3	3145/495/15,7	X
	20	4	3607/459/12,7	X
$40 \times 40 \times 600$	20	Без отв.	9700/1760/18,1	X
	20	1	8796/1606/18,3	XX
	20	3	7887/2484/31,5	X
	20	4	9620/1753/18,2	X
$50 \times 50 \times 750$	20	0	13431/1917/14,3	X
	20	3 (5 мм)	10200/1959/19,2	X
	20	3 (12,5 мм)	13462/1381/10,3	X

Табл. 2. Обобщенные результаты испытаний образцов при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении

Количество отверстий	Количество образцов	$R_{усл. \max}$ (среднее/ст. откл./коэффициент вар.), Н	Однородность групп
Без отв.	20	4818/660/13,7	X
1	20	4390/451/10,3	X
2	20	4110/381/9,3	X
3	20	3363/352/10,5	X

Влияние отверстий на прочность древесины сосны при статическом изгибе в зоне максимальных нормальных напряжений зависит от расположения отверстия в образце. Установлено, что его наличие в нейтральном слое (см. рис. 2, б, поз. 2) статистически не влияло на прочность древесины в образцах с поперечным сечением $20 \times 20 \text{ мм}^2$, однако отверстия в других зонах значительно снижали прочность данных образцов. Для сечения $30 \times 30 \text{ мм}^2$ наличие отверстия по направлению приложения нагрузки (см. рис. 2, б, поз. 4) не оказывало статистически значимого влияния, при этом в образцах с отверстиями в зоне сжатых (см. рис. 2, б, поз. 1) и растянутых волокон (см. рис. 2, б, поз. 3) отмечалось значимое снижение прочности. Для поперечных сечений $40 \times 40 \text{ мм}^2$ и $50 \times 50 \text{ мм}^2$ отверстия, расположенные в зоне растянутых волокон, также уменьшали прочность образцов при статическом изгибе.

Установлено, что отверстия в древесине сосны снижали условную максимальную силу $R_{усл. \max}$ при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении пропорционально изменению поперечного сечения образца при просверливании.

Выводы и рекомендации.

1. Оценку технического состояния элементов деревянных конструкций, находящихся под изгибающей нагрузкой, при использовании метода измерения сопротивления сверлению рекомендуется проводить в нейтральном слое или в направлении действия внешней изгибающей нагрузки.

2. Применение программных комплексов конечно-элементного моделирования для прогнозирования разрушения деревянных балок с отверстиями ограничено по причине сложноподвижного состояния материала под нагрузкой вокруг отверстия.

3. Влияние отверстий диаметром 3 мм на прочность реальных элементов конструкции, работающих на сжатие, незначительно.

4. Последующие исследования могут быть направлены на совершенствование модели древесины и разработку методики прогнозирования прочност-

НЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОТВЕРСТИЯМИ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ашкенази, Е. К.** Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – Москва: Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
2. **Уголев, Б. Н.** Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б. Н. Уголев. – Москва: МГУЛ, 2005. – 340 с.
3. **Шарапов, Е. С.** Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов : дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / Е. С. Шарапов. – Архангельск, 2020. – 340 с.
4. **Aicher, S.** Design of rectangular holes in glulam beams / S. Aicher, L. Höfflin // *Otto-Graf-Journal*. – 2003. – Vol. 14. – P. 211–229.
5. **Branco, J. M.** Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests and local interventions on two historic timber collar roof trusses / J. M. Branco, H. S. Sousa, E. Tsakanika // *Engineering Structures*. – 2017. – Vol. 140. – P. 209–224.
6. Characterization of decay in the wooden roof of the S. Agata Church of Ragusa Ibla (Southeastern Sicily) by means of sonic tomography and resistograph penetration tests / S. Imposa [et al.] // *The International Journal of Architectural Heritage*. – 2014. – Vol. 8 (2). – P. 213–223.
7. **Jeleč, M.** Glulam beams with holes / M. Jeleč, D. Varevac, J. Zovkić // *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-gfos*. – 2014. – Vol. 5. – P. 22–33.
8. **Pěňčík, J.** Modelling of Experimental Tests of Wooden Specimens from Scots Pine (*Pinus sylvestris*) with the Help of Anisotropic Plasticity Material Model / J. Pěňčík // *Drvna Industrija*. – 2015. – Vol. 66 (1). – P. 27–33.
9. **Rinn, F.** Basics of micro-resistance drilling for timber inspection / F. Rinn // *Holztechnologie*. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 24–28.

E-mail: korolevas@volgatech.net, sharapoves@volgatech.net, shlychkovsv@volgatech.net.

УДК 620.179.14

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ
КАК ИНДИКАТОР РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ НИКЕЛЯ*****В. Н. КОСТИН, В. Н. ПЕРОВ, Е. Д. СЕРБИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО***

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН

Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

**DIFFERENTIAL PERMEABILITY AS NICKEL RECRYSTALLIZATION
INDICATOR*****V. N. KOSTIN, V. N. PEROV, E. D. SERBIN, O. N. VASILENKO***

Аннотация. Установлено, что рекристаллизация холоднодеформированного никеля меняет форму его петли гистерезиса. На нисходящей и восходящей ветвях петли появляются перегибы, а на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_d(H)$ происходит расщепление пика на два. Изменение соотношения объемов деформированных и рекристаллизованных зерен отражается на соотношении пиков. Завершение рекристаллизации снова приводит к единственному пику на зависимости $\mu_d(H)$. Таким образом, дифференциальная проницаемость может служить параметром контроля рекристаллизации.

Ключевые слова: рекристаллизация, полевая зависимость дифференциальной магнитной проницаемости, поле максимума проницаемости.

Abstract. It has been established that the recrystallization of cold-deformed nickel changes the shape of its hysteresis loop. Inflections appear on the descending and ascending branches of the loop, and the peak of the field dependence of the differential magnetic permeability $\mu_d(H)$ splits into two. A change in the ratio of the volumes of deformed and recrystallized grains is reflected in the peak ratio. Completion of recrystallization again leads to a single peak in the dependence of $\mu_d(H)$. Thus, differential permeability can serve as a recrystallization testing parameter.

Keywords: recrystallization, field differential dependence of permeability, field of maximum permeability.

Никель широко используется в различных отраслях промышленности. Несмотря на давнюю историю применения, интерес к исследованию свойств никеля и сплавов на его основе не ослабевает [1–3].

Являясь типичным ферромагнетиком, никель имеет значительно большее число 90-градусных доменных границ, чем железо, и, соответственно, более высокую чувствительность магнитных свойств к структуре и напряжениям [4, 5]. Исследование эволюции магнитных свойств при отжиге холоднодеформированного никеля при вариации режимов отжига может дать новые сведения о взаимосвязях магнитных и структурных характеристик никеля. Такие сведения могут быть полезны для структуроскопии широкого класса железоникелевых сплавов.

Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости на нисходящей ветви петли гистерезиса холоднодеформированного на 72 %

и отожженного при различных температурах никеля приведены на рис. 1–4. При увеличении $T_{отж}$ до 400 °С (см. рис. 1) на зависимости $\mu_d(H)$ имеется единственный пик дифференциальной магнитной проницаемости в поле $H_{\mu_d \max} = -0,543$ кА/м, причем коэрцитивное поле этого образца $H_c = -0,675$ кА/м.

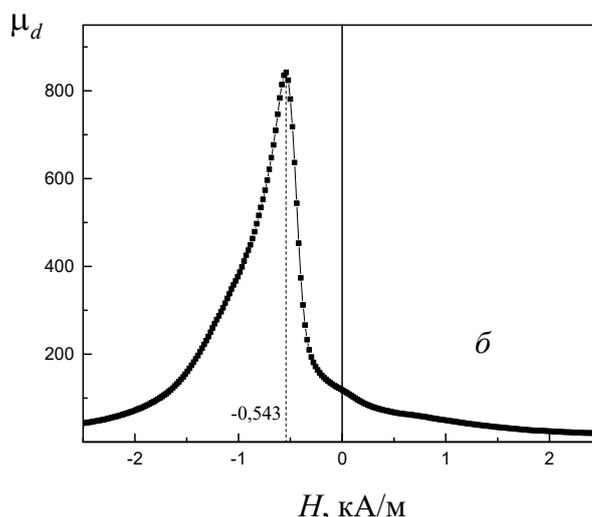


Рис. 1. Полевая зависимость дифференциальной магнитной проницаемости на нисходящей ветви петли (б) холоднодеформированного и отожженного при $T_{отж} = 400$ °С никеля

Известно [4, 5], что температура начала рекристаллизации деформированного технически чистого никеля примерно равна 400 °С. Как видно из рис. 2, при $T_{отж} = 500$ °С на зависимости $\mu_d(H)$ появляются два максимума в области отрицательных полей. Поле максимума I равно $H_{\mu_d \max} = -0,419$ кА/м, что близко к коэрцитивной силе данного образца ($H_c = -0,44$ кА/м). Поле максимума II в 6 раз меньше коэрцитивного поля и равно $H_{\mu_d \max} = -0,073$ кА/м. Это свидетельствует о появлении двух магнитных фаз с различными значениями коэрцитивной силы. Очевидно, это следует связывать с наличием в структуре никеля значительного количества новых неискажённых кристаллитов, которые растут, поглощая искажённые деформацией зёрна (первичная рекристаллизация [4, 5]).

Увеличение $T_{отж}$ до 600 °С приводит к резкому росту максимума II (см. рис. 3). Поля максимумов I ($H_{\mu_d \max} = -0,306$ кА/м) и II ($H_{\mu_d \max} = -0,046$ кА/м) уменьшились в сравнении с образцом, отожженным при 500 °С. Это связано с увеличением объема неискаженных зерен за счет оставшихся деформированных, а также с продолжающимся уменьшением средней плотности дислокаций и величины внутренних напряжений в материале.

При увеличении $T_{отж}$ до 800 °С (см. рис. 4) остается единственный пик, а максимум дифференциальной проницаемости достигает величины $\mu_d = 3600$

в том же самом поле $H_{\mu_{d \max}} = -0,043$ кА/м. При этом коэрцитивная сила падает до минимального значения $H_c = -0,047$ кА/м. Фактически это означает завершение процессов рекристаллизации.

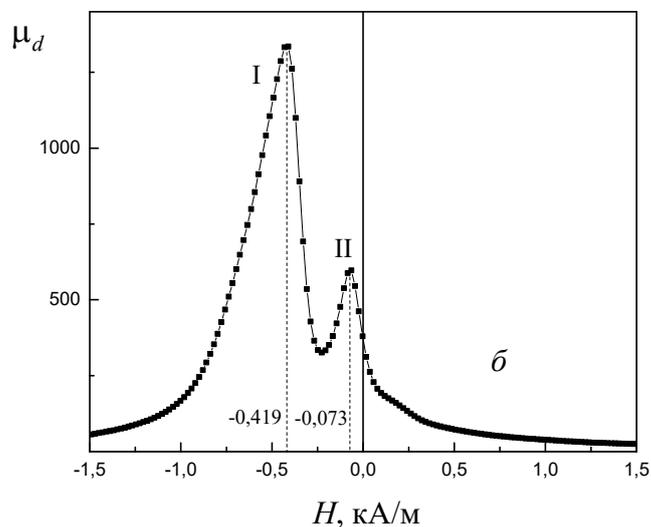


Рис. 2. Полевая зависимость дифференциальной магнитной проницаемости на нисходящей ветви петли (δ) холодndeформированного и отожженного при $T_{отж} = 500$ °С никеля

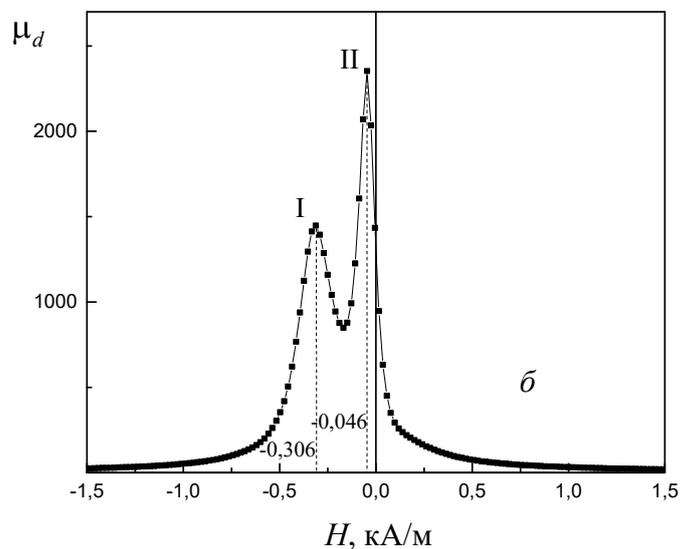


Рис. 3. Полевая зависимость дифференциальной магнитной проницаемости на нисходящей ветви петли (δ) холодndeформированного и отожженного при $T_{отж} = 600$ °С никеля

Таким образом, по изменению величины и характера полевой зависимости дифференциальной проницаемости можно определять степень рекристаллизации никеля.

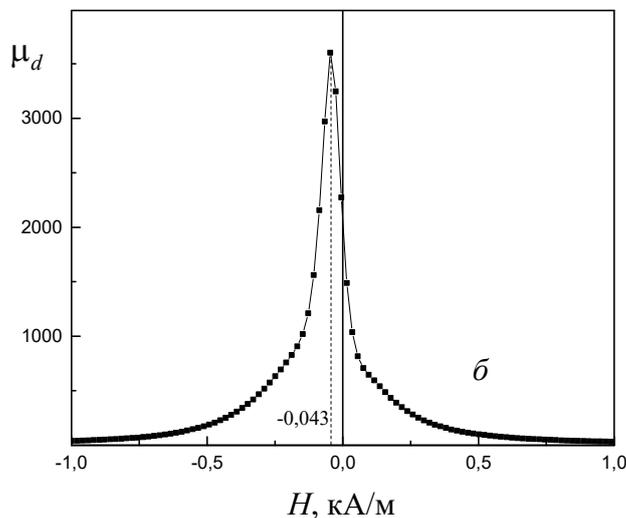


Рис. 4. Полевая зависимость дифференциальной магнитной проницаемости на нисходящей ветви петли (б) холоднодеформированного и отожженного при $T_{отж} = 800$ °С никеля

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», номер госрегистрации 122021000030-1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Камышанченко, Н. В.** Изменение макроструктуры и физико-механических свойств технически чистого никеля в процессе отжига в диапазоне 20 °С...600 °С / Н. В. Камышанченко, А. В. Гальцев, О. А. Печерина // Научные ведомости. – 2012. – № 11. – С. 145–148.
2. Analysis of the internal structure and lattice (mis)orientation in individual grains of deformed CP nickel polycrystals by synchrotron X-ray micro-diffraction and microscopy / A. M. Korsunsky [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2012. – № 42. – P. 1–13.
3. **Бозорт, Р.** Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – Москва: ИЛ, 1956. – 784 с.
4. **Лившиц, Б. Г.** Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – Москва: Металлургия, 1980. – 320 с.

E-mail: kostin@imp.uran.ru.

УДК 620.179

ОЦЕНКА ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИТУМНО-МАСТИЧНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОПРОВОДОВ*А. П. КРЕНЬ^{1,2}, О. В. МАЦУЛЕВИЧ¹, С. Ф. ГОРИЧЕНКО³, М. Н. ДЕЛЕНДИК²*¹Институт прикладной физики НАН Беларуси²Филиал Белорусского национального технического университета «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала»³УП «МИНГАЗ»

Минск, Беларусь

UDC 620.179

EVALUATION OF VISCOELASTIC CHARACTERISTICS OF BITUMEN-MASTIC INSULATION OF GAS PIPELINES*A. P. KREN, O. V. MARSULEVICH, S. F. GORICHENKO, M. N. DELENDIK*

Аннотация. Предложено использовать феноменологические модели для описания процесса деформирования битумно-мастичной изоляции, применяющейся для защиты газопроводов от электрохимической коррозии. На основании моделей Максвелла и Фойгта определены вязкоупругие характеристики изоляции при различных температурах и после старения. Показано, что коэффициент вязкости может использоваться для оценки степени деградации изоляции.

Ключевые слова: газопровод, изоляция, индентирование, старение.

Abstract. It is proposed to use phenomenological models to describe the straining process of bitumen-mastic insulation used to protect gas pipelines from electrochemical corrosion. Based on Maxwell and Voigt models, the viscoelastic characteristics of insulation at different temperatures and after aging are determined. It is shown that the viscosity coefficient can be used to assess the degree of degradation of insulation.

Keywords: gas pipeline, insulation, indentation, aging.

Битумно-мастичная изоляция широко использовалась в качестве защитного антикоррозионного покрытия внутригородских и магистральных трубопроводов 20 и более лет назад. По мере деградации происходит плановая ее замена на полимерную ленточную изоляцию. При этом главным параметром, который служит в качестве основного ориентира для определения срока замены, является значение переходного сопротивления «металл – изоляция – грунт». Величина переходного сопротивления зависит не только от степени старения изоляции, но и от состояния металла и грунта. В связи с этим при определении остаточного ресурса важно разделить влияние различных факторов и провести либо замену изоляции, либо мероприятия по снижению, например, влажности грунта.

Для оценки состояния непосредственно изоляции необходимо использовать объективные методы контроля и параметры, которые могут быть оценены количественно. Выполненные ранее исследования [1] показывают, что для оценки свойств вязкоупругих материалов может использоваться метод

индентирования. С его помощью свойства битума (эластичные и вязкоупругие) могут быть определены на различных масштабных уровнях и условиях испытаний. Реакция битума на вдавливание может быть тщательно изучена в широком диапазоне параметров испытаний, таких как температура, скорость нагружения, геометрия индентора и т. д.

В работе исследуются возможности метода динамического индентирования для оценки вязкоупругих характеристик битумно-мастичной изоляции.

Основной проблемой испытаний является выбор оптимальной модели деформирования. При различных температурах битум может существовать в разных структурно-механических состояниях (рис. 1). Эти же состояния могут достигаться при различных скоростях деформирования. В области достаточно низких температур (область 1) полимер находится в твердом состоянии, деформация его невелика и мало меняется с повышением температуры.

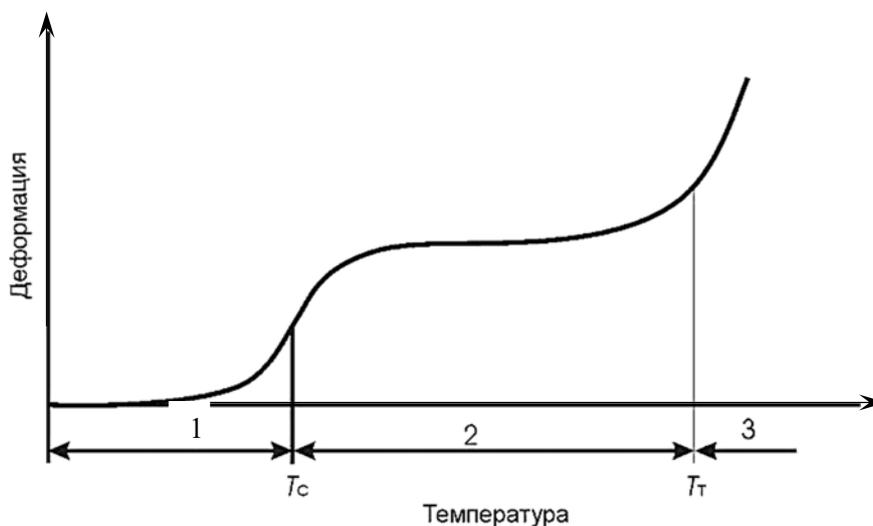


Рис. 1. Зависимость деформации от температуры при постоянном напряжении (термомеханическая кривая): 1 – область стеклования; 2 – область высокоэластичности; 3 – область текучести

В стеклообразном состоянии полимер деформируется чисто упруго и отставание по времени деформации от напряжения не наблюдается. В конце этой области (в точке, соответствующей температуре стеклования T_c) начинает резко возрастать деформация и, если нагрузка невелика, приближается к постоянной величине (область 2). Эта область соответствует высокоэластическому состоянию битума, в котором деформации после прекращения механического воздействия, хотя и с запаздыванием, но так же как и в стеклообразном состоянии, полностью восстанавливаются. При дальнейшем повышении температуры наблюдается необратимое течение материала (область 3). Температура, при которой наступает быстрое развитие необратимой деформации, называется температурой текучести T_t . Анализируя области состояния отметим, что в интервале температур, соответствующих области 1, материал, находящийся в стеклообразном состоянии, имеет максимальный модуль упругости, который составляет порядка $1 \dots 3 \cdot 10^3$ МПа (рис. 2).

Состояние материала в области 2 характеризуется очень малым модулем упругости ($E \sim 2$ МПа) и относительно небольшой вязкостью, что соответствует классу высокоэластических полимеров (натуральных каучуков и синтетических резин). В области 3 определяющей характеристикой материала уже является не модуль упругости, а вязкость.

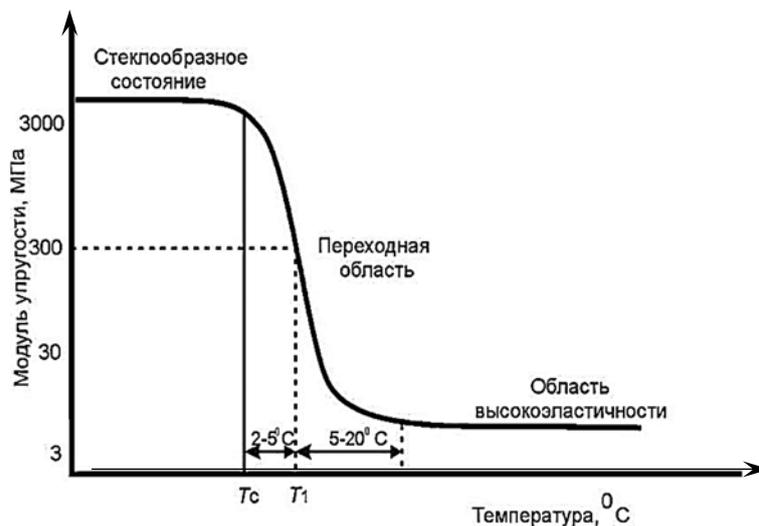


Рис. 2. Зависимость модуля упругости от температуры для полимера (не имеющего вязкотекучего состояния)

В области температур, близких к T_c , состояние материала можно характеризовать как промежуточное между стеклообразным и высокоэластическим. Реакцию материала на внешнее воздействие в этом случае можно описать с помощью уравнений (1) и (2).

Уравнение деформирования упругого тела описывается законом Гука, согласно которому напряжение (сопротивление деформированию) определяется только величиной деформации [2]:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала.

В противоположность этому, сопротивление вязкой жидкости определяется только скоростью деформации и не зависит от величины деформации. Уравнение, описывающее этот процесс, носит название закона Ньютона:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (2)$$

где η – вязкость жидкости.

Для описания деформирования битума при индентировании можно использовать феноменологические модели взаимодействия индентора с материалом (рис. 3) и определяющие уравнения (3)–(6).

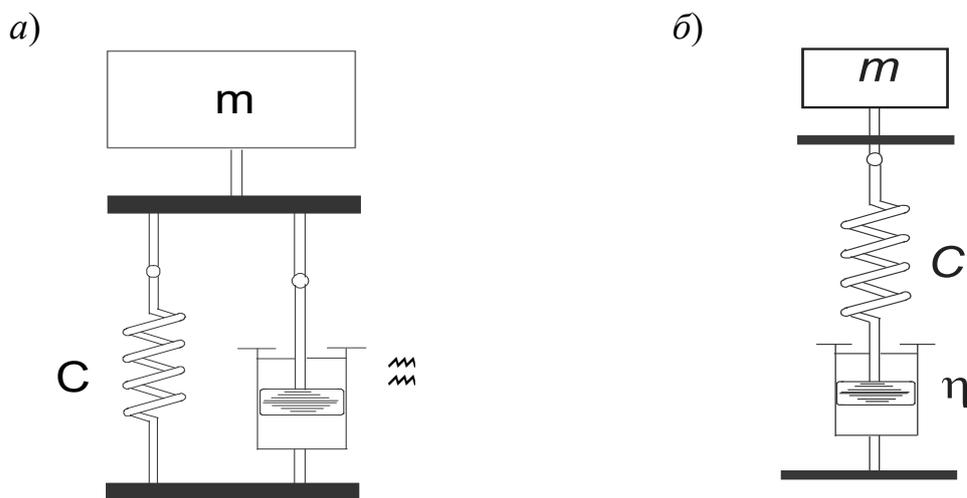


Рис. 3. Модели материала: *a* – модель Фойгта; *б* – модель Максвелла

Формулы для расчета можно найти в [3, 4].

Для модели Фойгта

$$c_{\Phi} = \frac{m\pi^2}{t_{уд}^2}, \quad (3)$$

где $t_{уд}$ – длительность удара; m – масса индентора.

$$\eta_{\Phi} = \frac{m}{t_{уд}} \ln\left(\frac{V_0}{V}\right), \quad (4)$$

где V_0 – скорость подлета; V – скорость отлета индентора.

Для модели Максвелла

$$c_M = mw^2 \left(1 + \frac{\ln\left(\frac{V_0}{V}\right)^2}{4\pi^2} \right), \quad (5)$$

где $w = \frac{\pi}{t_{уд}}$.

$$\eta_M = \frac{ct_{уд}}{\ln\left(\frac{V_0}{V}\right)}. \quad (6)$$

Оценка жесткости и вязкости производилась на основании диаграммы внедрения индентора, полученной на установке ИПМ, разработанной в ИПФ НАН Беларуси [5].

Результаты измерений на образцах битумно-мастичной изоляции, взятых при ремонте различных газопроводов, представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, изменение вязкости и жесткости наблюдается как при изменении температуры, так и при проведении старения. Наибольшая чувствительность к старению наблюдается при отрицательных температурах для коэффициента вязкости для модели Максвелла: изменение составило 95 % (с 466 до 910 Н·с/м). Это, по-видимому, связано с изменением температуры стеклования битума,

которая является важным идентификатором термомеханического поведения полимеров и фундаментальной мерой склонности полимеров к молекулярной подвижности.

Табл. 1. Результаты измерений

Температура, °С	c_{ϕ} , кН/м	η_{ϕ} , Н·с/м	$c_{\text{м}}$, кН/м	$\eta_{\text{м}}$, Н·с/м
<i>Образец после старения при 100 °С в течение 3 сут</i>				
23	324	8,7	329	169
10	692	7,69	695	410
-13	1060	5,26	1051	910
<i>Исходный образец</i>				
22	409	8,32	412	22
10	549	8,29	553	299
-13	781	7,60	784	466

Выводы. Предварительные исследования показывают, что динамическое индентирование может использоваться для диагностирования битумно-мастичной изоляции. Исследования по изучению изменения свойств при искусственном старении изоляции и определению таких ее параметров, как температура стеклования, представляются перспективными для прогнозирования остаточного ресурса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Грант Т22-005 «Изучение процессов деградации изоляционных покрытий газопроводов и разработка методики неразрушающего контроля их свойств и остаточного ресурса».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stolz, M.** Experimental verification of a viscoelastic model for computing cartilage modulus from microindentation data / M. Stolz, A. P. Kren, A. U. Daniels // 17-th Congress of the European Society of Biomechanics. – Edinburgh: United Kingdom, 2010.
2. **Christensen, R. M.** Theory of Viscoelasticity / R. M. Christensen. – Second Edition, 1982. – 364 p.
3. **Мозгалев, В. В.** Исследование возможности оценки степени вулканизации резин методом динамического индентирования / В. В. Мозгалев, А. П. Крень, В. А. Рудницкий // Материалы, технологии, инструменты. – 2008. – № 1. – С. 98–104.
4. **Pratasenia, T. A.** Application of the Dynamic Indentation Method for Evaluation of the Hardness and Elastic Modulus of the Material of Products Obtained by Extrusion Method of Additive Production from Carbon-Filled Composite Materials / T. A. Pratasenia, A. P. Kren, H. N. Dyakova // Mechanics of Composite Materials. – 2022. – Vol. 58. – P. 383–394.
5. **Kren, A.** Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation / A. Kren, M. Delendik, A. Machikhin // International Journal of Impact Engineering. – 2022. – Vol. 162. – P. 104–141.

УДК 620.179

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ ПРИБОРОМ НТ-800 С ПОКАЗАНИЯМИ
РЕНТГЕНОВСКОГО ДИФРАКТОМЕТРА**

А. Ю. КУТЕПОВ, А. П. КРЕНЬ

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179

**COMPARISON OF RESIDUAL STRESSES MEASUREMENT USING NT-800
DEVICE WITH X-RAY DIFFRACTOMETER READINGS**

A. YU. KUTEPOV, A. P. KREN

Аннотация. Установлен характер изменения механических напряжений прибором НТ-800 и рентгеновским дифрактометром при растяжении образца с неизвестным исходным уровнем внутренних напряжений. Определены амплитуда и направление действия главных максимальных напряжений, измеренных с использованием рентгеновского дифрактометра. Показано, что изменение приложенных напряжений, измеренных прибором НТ-800, соответствует изменению показаний рентгеновского дифрактометра.

Ключевые слова: никель, напряжения, дифрактометр, пондеромоторный метод.

Abstract. The mechanical stress change nature was determined using NT-800 device and x-ray diffractometer by tensile deformation of a specimen with an unknown level of initial residual stress. The amplitude and the direction of the main maximum stress were determined using x-ray diffractometer. It was shown, that change of applied stress, measured by NT-800 device corresponds to the change of x-ray diffractometer readings.

Keywords: nickel, stress, diffractometer, ponderomotive method.

Неравномерное распределение или высокий уровень напряжений в функциональных теплозащитных покрытиях, например, таких как никелевые покрытия, может приводить к их разрушению и отслаиванию. Существует ряд методов, позволяющих проводить оценку действующих напряжений. Одним из них является магнитный пондеромоторный метод, который положен в основу прибора НТ-800, разработанного в ИПФ НАН Беларуси. Данный прибор может быть использован для измерения толщины никелевых покрытий в диапазоне от 200 до 800 мкм, а также для проведения оценки уровня действующих напряжений. Преимуществами прибора являются портативность, высокая локальность измерений и возможность проводить измерения в труднодоступных местах (рис. 1, а).

На сегодняшний день не существует общепринятой методики подтверждения метрологических характеристик приборов для определения уровня напряжений вследствие отсутствия государственных эталонов. В этой связи при построении градуировочных зависимостей для НТ-800 используются данные по одноосному растяжению образцов с фиксацией уровня, создаваемых с помощью внешней нагрузки напряжений в металле. Была исследована сходимость данных,

получаемых НТ-800, с результатами измерений внутренних напряжений, полученных с помощью метода дифракции рентгеновских лучей, для проверки адекватности градуировки прибора.

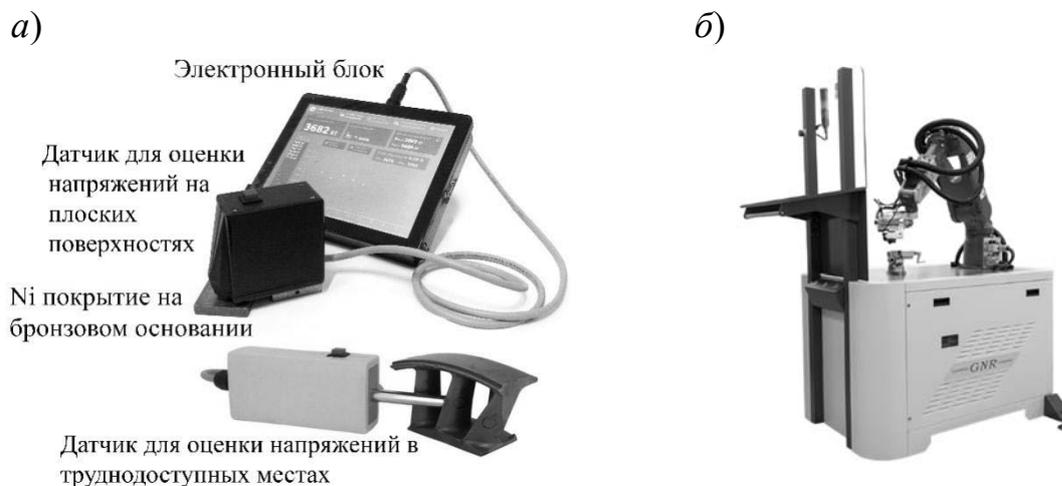


Рис. 1. Прибор НТ-800 (а), рентгеновский дифрактометр GNR StressX (б)

Для проведения экспериментов были изготовлены никелевые образцы, имитирующие никелевое покрытие. Эти образцы представляли собой вырезки из никелевого проката по ГОСТ 2170–73 *Ленты из никеля и низколегированных сплавов никеля. Технические условия* толщиной 100 мкм в виде лопаток по ГОСТ 1497–84 *Металлы. Методы испытаний на растяжение*.

Для оценки напряжений методом рентгеновской дифракции использовался дифрактометр GNR StressX (рис. 1, б). На стол дифрактометра устанавливалось специально сконструированное устройство, позволяющее в ручном режиме проводить растяжение образцов с фиксацией усилия растяжения с помощью динамометра. Малая толщина никелевого образца была выбрана для того, чтобы имелась возможность задать высокий уровень напряжений в образце, учитывая особенности конструкции используемой установки для растяжения, не позволяющей создавать большие усилия.

Испытание проводилось путем поэтапного нагружения образца. На каждом этапе нагружения осуществлялись измерения дифрактометром в двух точках и измерения прибором НТ-800 в трех точках испытуемого образца двумя датчиками: датчиком для измерений на плоских поверхностях (датчик А) и датчиком для измерений в труднодоступных местах (датчик Б). Измерения прибором НТ-800 проводились с автоматической статистической обработкой выбросов и автоматическим подсчетом среднего серии измерений в одной точке. Затем полученные результаты усреднялись для образца по трем точкам в случае измерений прибором НТ-800 и по двум точкам в случае измерений дифрактометром.

Диаграмма изменения амплитуды максимальных главных напряжений и направлений их действия относительно оси растяжения показана на рис. 2.

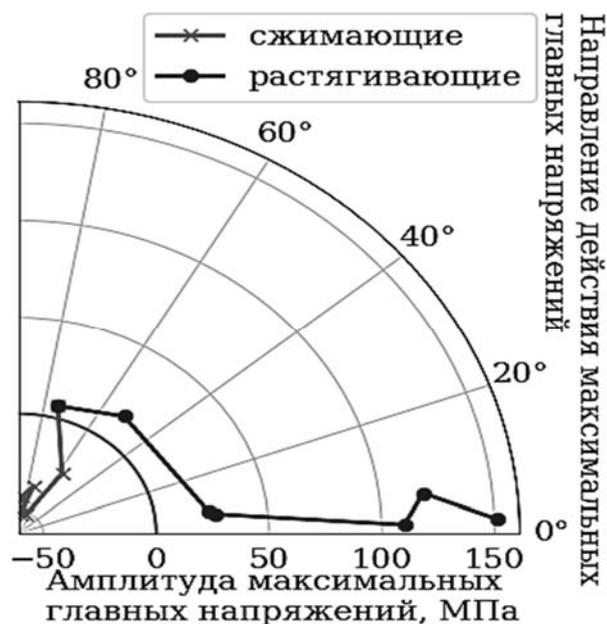


Рис. 2. Диаграмма максимальных главных напряжений, полученных на дифрактометре при растяжении никелевого образца

Из рис. 2 видно, что во время растяжения образца изменялись амплитуда и знак напряжений. До приложения внешнего усилия величина остаточных напряжений составляла -50 МПа и они являлись сжимающими, а направление действия было перпендикулярно оси образца. После приложения максимально возможного внешнего усилия величина напряжений, фиксируемых дифрактометром, составила $+150$ МПа (напряжения стали растягивающими), а направление их действия совпадало с осью растяжения. Наличие в образце исходных сжимающих напряжений было обусловлено холодной прокаткой при их изготовлении. Из предыдущих исследований известно [1], что наличие в образце остаточных микронапряжений, обусловленных пластическими деформациями, приводит к снижению отрывного усилия магнита в датчиках НТ-800 и, соответственно, к увеличению показаний при измерении напряжений.

Для того чтобы сравнить данные по измерению напряжений прибором НТ-800 и показания дифрактометра исключительно по приложенным напряжениям $\sigma_{прил}$, из полученных результатов были вычтены остаточные микронапряжения в никелевом образце. Сравнение измерения приложенных напряжений дифрактометром с оценкой приложенных напряжений прибором НТ-800 приведено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что зависимость между показаниями прибора НТ-800 и величиной максимальных главных напряжений, измеренной на дифрактометре, практически прямая. В то же время наблюдаются расхождения между показаниями датчиков прибора НТ-800 и большой разброс в диапазоне от -30 до $+20$ МПа. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что градуировки датчиков для оценки напряжений НТ-800 были выполнены для толщин от 200 до 800 мкм, а аппроксимация до 100 мкм (толщины испытуемого образца) внесла дополнительную погрешность.

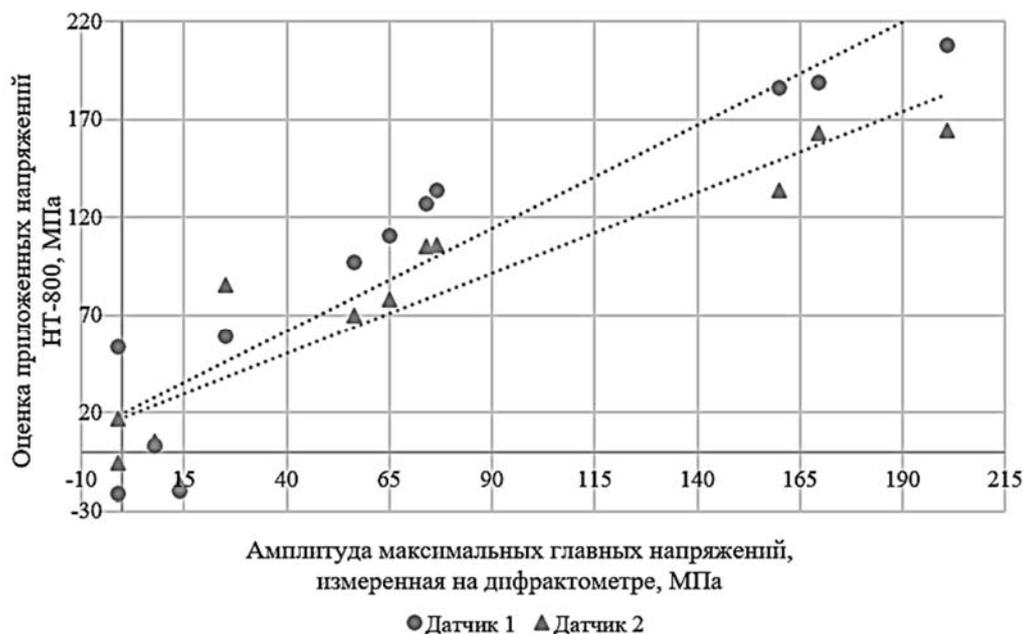


Рис. 3. Сравнение оценки напряжений датчиками NT-800 с показаниями дифрактометра

Полученные данные позволяют говорить о том, что полноценное сравнение показаний прибора NT-800 и рентгеновского дифрактометра можно провести при условии, что известны два дополнительных параметра: толщина образца (предпочтительно она должна быть в диапазоне 200...800 мкм) и уровень остаточных напряжений. Для этого необходимо изготовить образцы разных толщин в диапазоне, который покрывается градуировками датчиков для оценки напряжений, и отжечь эти образцы с целью снятия остаточных напряжений. Далее, проводя циклы нагружения-разгрузки, аналогичные описанным в [2], получить набор данных, позволяющих оценить влияние на показания прибора NT-800 остаточных микронапряжений, обусловленных пластической деформацией. С использованием дифрактометра их можно рассчитать через параметр Full Width Half Magnitude (FWHM). Это необходимо сделать отдельно для упругих приложенных растягивающих напряжений с разным уровнем исходных напряжений и отдельно для упругопластического деформирования для соответствующего $\sigma_{прил}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кутепов, А. Ю.** Оценка прецизионности прибора NT-800 для контроля никелевых покрытий / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень, Е. В. Гнутенко // Приборостроение-2020: материалы 13 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 нояб. 2020 г. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 71–72.
2. **Кутепов, А. Ю.** Оценка растягивающих напряжений в никелевых покрытиях магнитным пондеромоторным методом / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень, Е. В. Гнутенко // Приборостроение-2018: материалы 11 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14–16 нояб. 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 28–30.

УДК 535.5 + 621.658.011 : 620.1

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ СТЕКЛЯННЫХ КОНТЕЙНЕРАХ

И. М. КУХАРЕНКО, И. С. САВИЦКИЙ, И. У. ПРИМАК, А. В. ХОМЧЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 535.5 + 621.658.011 : 620.1

PHOTOELASTIC MECHANICAL STRESS MEASUREMENT IN THIN-WALLED GLASS CONTAINERS

I. M. KUHARENKO, I. S. SAVITSKY, I. U. PRIMAK, A. V. KHOMCHENKO

Аннотация. Описан способ измерения механических напряжений в тонкостенных стеклянных контейнерах малого размера. Продемонстрирована возможность измерения распределения двулучепреломления в стеклянных контейнерах методами поляризационной интерферометрии и интегральной оптической поляриметрии. Исследованы возможности и границы применения метода при анализе распределения величины механических напряжений в таких объектах, используемых в качестве терморазрывных чувствительных элементов системы пожаротушения. Установлена зависимость распределения разности фаз, полученная в результате обработки распределений интенсивности поляризованного излучения, прошедшего через исследуемый объект, от величины нагрузки на термочувствительный элемент, что позволяет оценивать в нем механические напряжения.

Ключевые слова: закаленное стекло, поляриметрия, поляризационная интерферометрия, интегральная оптическая поляриметрия, метод измерения, остаточные напряжения, распределение двулучепреломления.

Abstract. The technique for testing of mechanical stress in in small thin-walled glass containers is presented. It is shown possibility of the testing of birefringence distribution in containers by polarization interferometry and modified integrated photoelasticity technique. The possibilities and application borders of the technique at analysis of the mechanical stress distribution in such object, used as the detector elements in the stewing fire system, are studied. The birefringence distribution as result of the processing of their images, recorded at polarized light, is obtained. The obtained dependency of the birefringence distribution on the load value on the thermosensitive element allows to determine the mechanical stress, is received.

Keywords: tempered glass, polarimetry, polarization interferometry, photoelastic stress measurement, measurement technique, residual stress, birefringence distribution.

Остаточные напряжения являются одной из важнейших характеристик изделий из стекла с точки зрения их прочности. В течение десятилетий методы оптической поляриметрии были наиболее широко используемыми методами контроля качества в стекольной промышленности. Напряжения в стеклянных изделиях осесимметричной формы в большинстве случаев определяют таким образом. Однако некоторые изделия имеют несимметричную форму. Определение трехмерных полей напряжений в целом в этих изделиях требует применения сложных методов, которые в тонкостенных объектах обычно малоэффективны. Известно применение интегральной оптической поляримет-

рии для определения напряжений в несимметричных контейнерах, но такой подход не обеспечивает высокой точности при контроле трехмерных объектов малых размеров. Более того, методы оптической поляриметрии нельзя применять для измерения малых значений механических напряжений. В работе приведены результаты исследований по разработке и созданию установки поляризационной интерферометрии для измерения напряжений в таких объектах, используемых в качестве терморазрывных чувствительных элементах системы пожаротушения.

Для исследования распределения технологических механических напряжений в объеме таких малых трехмерных объектов создана установка, представленная на рис. 1. Использование цифрового фоторегистрирующего устройства и разработанного программного продукта для дискретного сканирования изображения в выбранном сечении объекта позволяют получать распределение напряжений в объеме контролируемого объекта (рис. 2).



Рис. 1. Установка для контроля распределения напряжений в тонкостенных стеклянных контейнерах

a)



б)

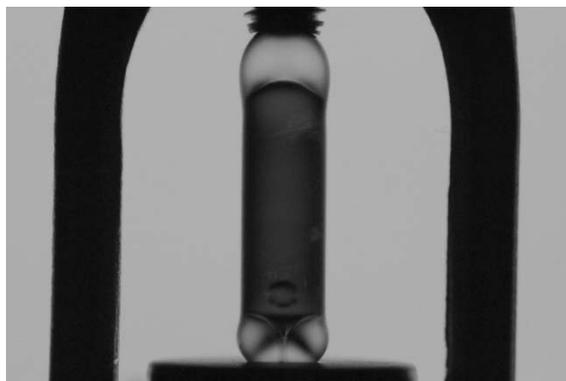


Рис. 2. Изображение (*a*) и иллюстрация распределения напряжений в колбе терморазрывного чувствительного элемента (*б*)

Принципиальная схема установки, реализующей данный метод измерения разности фаз анизотропных материалов, представлена на рис. 3. В качестве источника света использован ЖК-монитор с люминесцентной подсветкой 1, свет от которого, пройдя через поляризатор 2, становится поляризованным. Линейно-поляризованный свет, проходя через исследуемый контейнер 3, в котором присутствуют механические напряжения, изменяет свое состояние поляризации (в стекле возникают обыкновенная и необыкновенная волны). После этого излучение, проходя через анализатор 4, скрещенный с поляризатором 2 (под углом 90°), попадает в фоторегистрирующее устройство 7. При этом регистрируемая интенсивность света (см. рис. 2, б) является функцией координат и величины механических напряжений в отдельной точке исследуемого объекта.

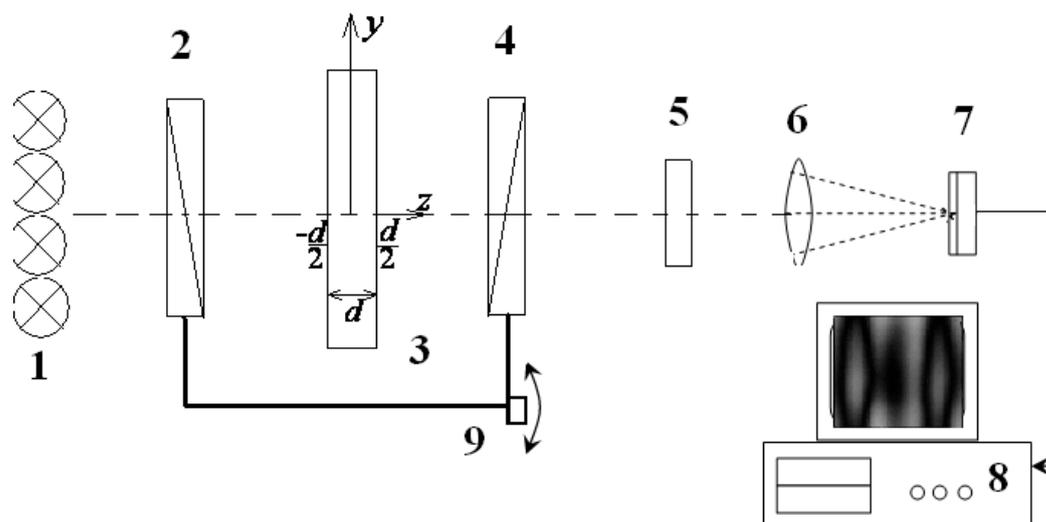


Рис. 3. Схема измерительной установки: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – контролируемое автомобильное стекло; 4 – анализатор; 5 – светофильтр; 6 – объектив; 7 – фоторегистрирующее устройство; 8 – компьютер; 9 – система поворота

Исследованы возможности метода для определения малых значений механических напряжений в цилиндрических контейнерах диаметром 3 мм, основанного на регистрации и обработке изображений контролируемого объекта в поляризованном свете. Поляризационно-оптические измерения возникающего двулучепреломления позволяют оценить величину и распределение этих напряжений. Программное обеспечение позволяет проводить анализ изображений исследуемого объекта в поляризованном свете и определять в соответствии с предложенным алгоритмом величину механических напряжений и их распределение в поперечном сечении образца. При наличии напряжений коэффициент пропускания в каждой отдельной точке образца связан с величиной механических напряжений, поэтому, измеряя распределение интенсивности света, можно анализировать (рис. 4) и оценивать величину механических напряжений.

Установка обеспечивает контроль распределения и оценку величины остаточных механических напряжений в терморазрывном чувствительном элементе системы пожаротушения.

Величина механических напряжений оценена также независимым методом с использованием динамометрического ключа с предустановкой крутящего момента, погрешность установки – 6 % (рис. 5).

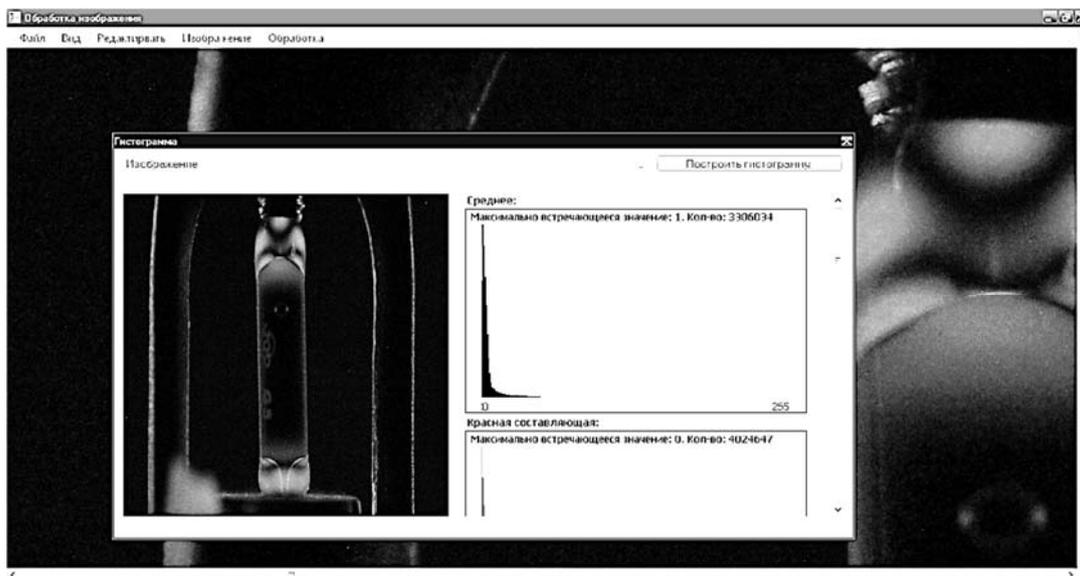


Рис. 4. Анализ поляризационных интерферограмм

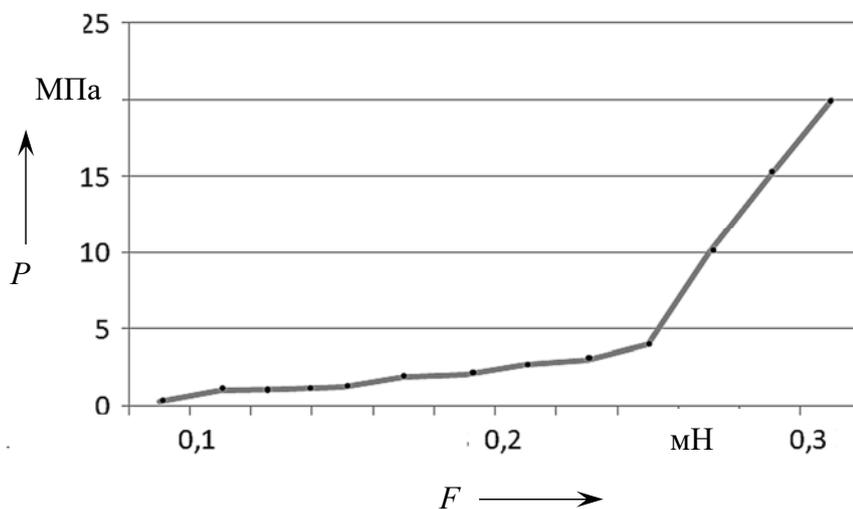


Рис. 5. Зависимость механических напряжений в колбе от приложенной нагрузки

Таким образом, показана возможность определения малых значений механических напряжений в цилиндрических стеклянных контейнерах диаметром 3 мм, наименьшее значение регистрируемых напряжений – 0,1 МПа.

E-mail: avkh@bru.by.

УДК 620.179.14

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ КОСВЕННЫМ МЕТОДОМ*А. В. КУШНЕР, А. В. ШИЛОВ, В. А. НОВИКОВ*

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 620.179.14

INDIRECT METHOD OF DETECTION OF FLAW IN WELDED JOINTS*A. V. KUSHNER, A. V. SHILOV, V. A. NOVIKOV*

Аннотация. Разработана методика магнитографического контроля, позволяющая в одностороннем стыковом сварном соединении обнаружить выпуклость обратной стороны шва и по ее наличию косвенно судить об отсутствии непровара в нем. Определен информативный параметр наличия обратного валика шва при магнитографическом контроле таких соединений – присутствие двух одинаковых кососимметрично расположенных сигналов на сигналограмме.

Ключевые слова: ферромагнитные объекты, сварные соединения, дефекты, магнитографический контроль.

Abstract. A method of magnetographic inspection was developed to detect the back side convexity in a one-sided weld, and by the presence of the convexity, to conclude about the incomplete penetration of the weld. An informative parameter for the presence of a backside weld bead during magnetographic inspection of such joints was determined – the presence of two identical asymmetrically located signals in the signal pattern.

Keywords: ferromagnetic objects, welded joints, defects, magnetographic control.

Магнитографический метод контроля включает следующие технологические операции: намагничивание контролируемого ферромагнитного объекта вместе с уложенной на его поверхность и плотно прижатой к ней магнитной лентой (при этом на ленту записывается магнитный рельеф объекта), считывание с ленты полученной информации с помощью магнитографического дефектоскопа, ее расшифровка и определение на ней участков, соответствующих недопустимым дефектам в объекте, разметка дефектных мест на поверхности объекта по предварительно сделанной привязке ленты.

Метод контроля прост в реализации, характеризуется высокой производительностью и экономичностью, может применяться при обнаружении дефектов сплошности изделий с одинаковой толщиной стенки или стыковых сварных соединений. В последнем случае его рекомендуют применять, если коэффициент формы выпуклости шва, равный отношению ширины выпуклости b к ее высоте c , меньше 7 ($\psi = b/c < 7$) [1]. Это объясняется резким возрастанием размагничивающего фактора выпуклости шва при $\psi < 7$. Если $\psi < 7$, то не удастся достичь необходимой магнитной индукции в плоскости симметрии шва и его окрестностях, где по статистическим данным находится

до 90 % дефектов сплошности. Следовательно, находящиеся в этой зоне дефекты будут обнаруживаться неудовлетворительно.

Рассмотрим подробнее параметры выпуклости сварного шва, выполненного сваркой под флюсом, согласно ГОСТ 8713–79, условное обозначение сварного соединения С47. При толщине свариваемых деталей $S > 3$ мм и номинальной высоте выпуклости шва $C_{ном} = 2,0_{-0,5}^{+1}$ мм имеем: для $2 \leq S < 3$ мм при ширине шва $b = 10$ мм $3,3 \leq \psi \leq 6,6$; для $3 \leq S < 4$ мм при ширине шва $b = 12$ мм $4,0 \leq \psi \leq 8,0$; для $4 \leq S < 6$ мм при ширине шва $b = 14$ мм $4,6 \leq \psi \leq 9,3$; для $6 \leq S < 8$ мм при ширине шва $b = 16$ мм $5,3 \leq \psi \leq 10,6$; для $8 \leq S < 10$ мм при ширине шва $b = 19$ мм $6,3 \leq \psi \leq 12,6$; для $10 \leq S < 12$ мм при ширине шва $b = 21$ мм $7,0 \leq \psi \leq 14,0$.

Как видно из приведенных данных, сварные швы при малой толщине свариваемых деталей ($2 \leq S < 6$ мм) имеют большой диапазон изменения параметров выпуклости, при которых $\psi < 7$. Следует отметить, что стыковые сварные соединения такой толщины весьма сложно проконтролировать акустическими методами, а методы радиационного контроля не всегда можно применить из-за специфики объекта.

Поэтому обнаружение дефектов в односторонних стыковых сварных соединениях косвенным методом является важной и актуальной задачей.

Проанализируем характер изменения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля $H_t(x)$ на поверхности одностороннего стыкового сварного соединения без выпуклости обратной стороны шва при поперечном намагничивании шва. Если дефектов в соединении нет, то $H_t(x)$ при намагничивании объекта однородным магнитным полем имеет вид U-образной кривой, ветви которой направлены вверх, а минимум расположен в плоскости симметрии шва (рис. 1) [1].

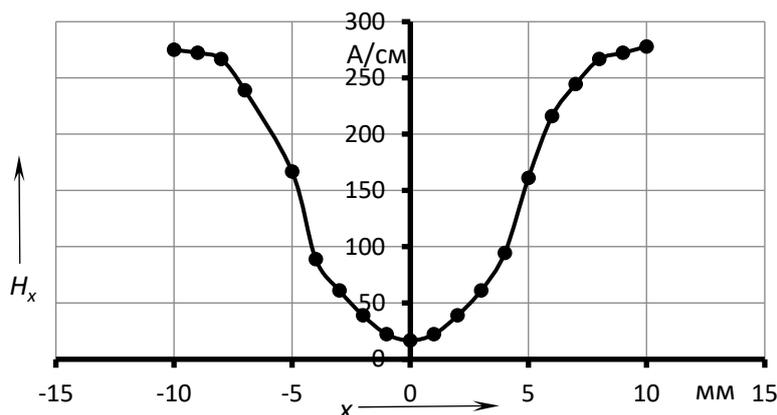


Рис. 1. Изменение тангенциальной составляющей напряженности поля на поверхности стыкового сварного соединения при отсутствии выпуклости обратной стороны шва

Известно, что так будет изменяться напряженность поля и в металле шва [1]. Причем для обнаружения несплошностей величиной в 10 % от толщины нужно создать в контролируемых сечениях магнитную индукцию в 1,7 Тл [2]. В сварных соединениях изделий из стали Ст3, 10, 09Г2 магнитная индукция

такой величины достигается при напряженности поля около 80 А/см. Однако этого недостаточно для уверенного обнаружения таких дефектов при магнитографическом методе контроля. Нужно еще подобрать магнитную ленту такого типа, чтобы рабочая точка *A* совпадала с началом крутого возрастающего участка магнитной характеристики ленты (рис. 2).

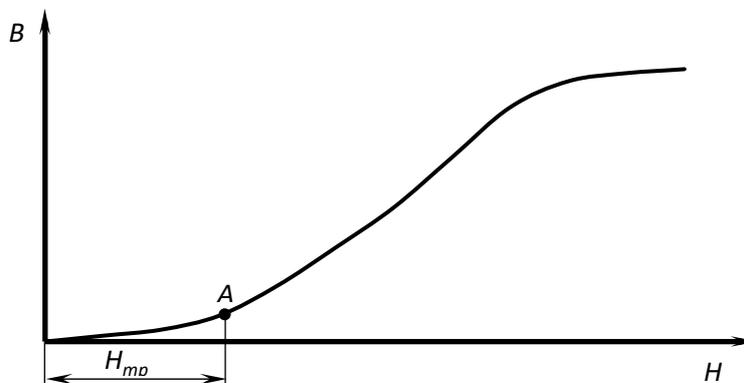


Рис. 2. Положение рабочей точки *A* на магнитной характеристике ленты: H_{mp} – требуемое значение напряженности поля

Эта точка приблизительно соответствует коэрцитивной силе магнитной ленты. По [3, табл. Б.2] выбираем магнитную ленту типа И4701-35 с коэрцитивной силой $H_c = H_{mp} = 80$ А/см. Итак, для уверенного обнаружения дефектов в шве стыкового сварного соединения нужно создать такое внешнее намагничивающее поле, при котором напряженность поля в плоскости симметрии шва будет составлять около 80 А/см, а для контроля использовать магнитную ленту типа И4701-35. Это обусловлено тем, что по статистическим данным в плоскости симметрии шва находится около 90 % дефектов.

Если в сварном шве нет обратной выпуклости и нет дефектов сплошности, то сигналограмма на экране дефектоскопа имеет вид, представленный на рис. 3, *а*, а при наличии дефекта – на рис. 3, *б*.

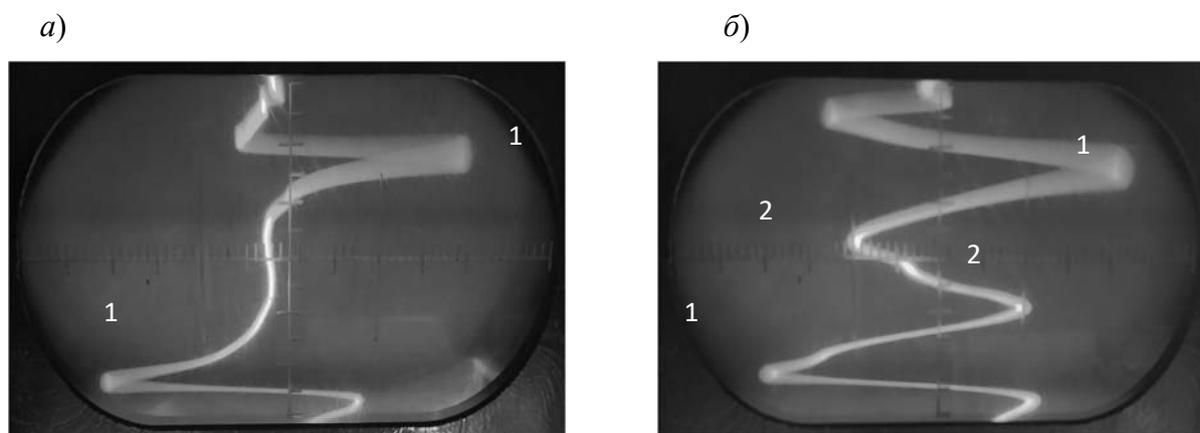


Рис. 3. Вид сигналограммы на экране дефектоскопа при отсутствии выпуклости обратной стороны шва: *а* – в шве нет дефекта; *б* – в шве есть дефект; 1 – помехи, обусловленные выпуклостью шва; 2 – сигнал, обусловленный дефектом

Для обеспечения полного проплавления соединяемых деталей сварку производят на остающейся подкладке, либо на охлаждаемой водой флюсо-медной подкладке с канавкой, формирующей обратный валик шва. При этом сварку производят на повышенном токовом режиме, который гарантирует полное проплавление металла, а подкладка – отсутствие прожога. Если подкладки нет, то, чтобы избежать опасности прожога, вначале производят подварку корня шва. При этом используют электроды меньшего диаметра и пониженный сварочный ток. Окончательную сварку выполняют за второй проход. Если при односторонней сварке происходит полное проплавление соединяемых деталей, то образуется обратный валик шва, что говорит о качественном соединении, т. е. об отсутствии непровара.

При наличии выпуклости обратной стороны шва изменяется сечение металла в зоне соединения, что приводит к изменению топографии тангенциальной составляющей результирующего поля на поверхности сварного соединения (рис. 4).

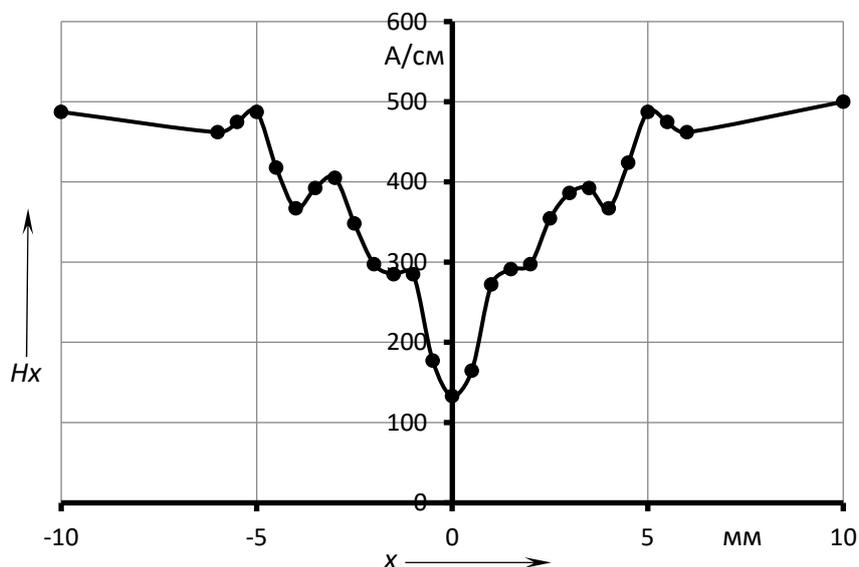


Рис. 4. Изменение тангенциальной составляющей результирующего поля на поверхности одностороннего сварного соединения с полным проплавлением: ширина наружной выпуклости шва $b_1 = 10,9$ мм, высота $c_1 = 2,45$ мм; ширина обратной выпуклости шва $b_2 = 7,8$ мм, высота $c_2 = 2,2$ мм

Как видно из рисунка, на одинаковом расстоянии от плоскости симметрии шва на кривой $H_x(x)$ наблюдаются небольшие колоколообразные выступы, т. е. происходит изменение напряженности поля. На сигналограмме им соответствуют два одинаковых кососимметрично расположенных сигнала 1 (рис. 5), что косвенно говорит об отсутствии непровара в сварном соединении. При этом сигнал размахом A можно ошибочно принять за сигнал, обусловленный дефектом. То, что это не так, можно понять, сравнивая сигналограммы на рис. 3, а и 5.

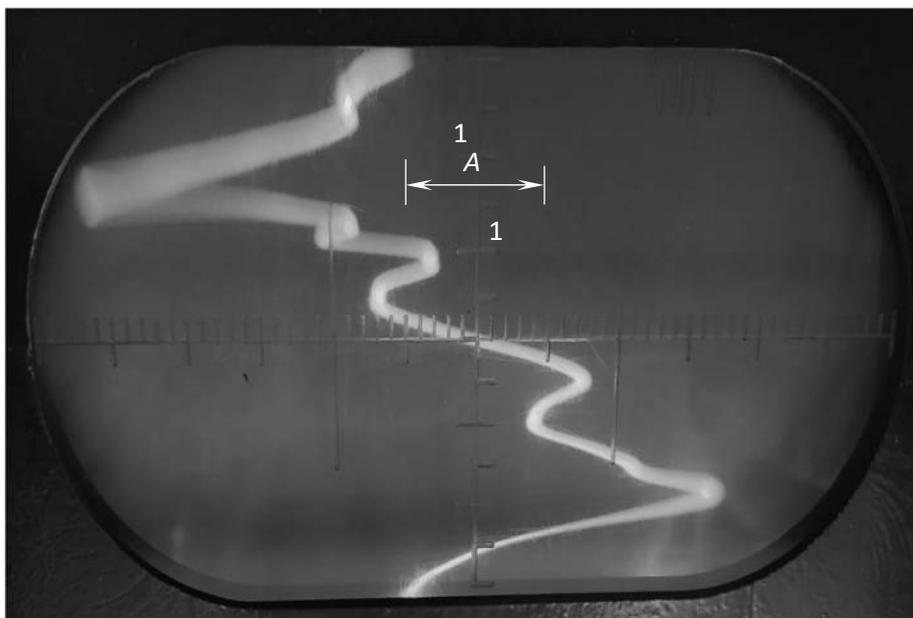


Рис. 5. Вид сигналограммы при магнитографическом контроле сварного соединения с выпуклостью обратной стороны шва (с полным проплавлением)

Итак, определен информативный параметр наличия выпуклости обратной стороны шва при магнитографическом контроле односторонних соединений, выполненных с полным проплавлением, – присутствие двух одинаковых кососимметрично расположенных сигналов на сигналограмме (см. рис. 5).

Таким образом, разработана методика магнитографического контроля, позволяющая в одностороннем стыковом сварном соединении обнаружить выпуклость обратной стороны шва и по ее наличию косвенно судить об отсутствии непровара в нем. Определен информативный параметр наличия обратного валика шва при магнитографическом контроле таких соединений – присутствие двух одинаковых кососимметрично расположенных сигналов на сигналограмме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козлов, В. С.** Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.: ил.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / Под ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 1976. – Т. 2. – 391 с.: ил.
3. **Новиков, В. А.** Магнитный контроль в вопросах и ответах: учебное пособие / В. А. Новиков. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – 347 с.
4. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии: а. с. SU 1677602 / В. А. Новиков. – Оpubл. 15.09.1991.

УДК 636.084.1

КОНТРОЛЬ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОЛОЧНЫХ ТАКСИ НА МОЛОЧНО-ТОВАРНЫХ ФЕРМАХ

Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ, Д. В. ШНИП

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 636.084.1

CONTROL OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF DAIRY TAXIS ON DAIRY COMMODITY FARMS

G. S. LENEVSKY, D. V. SHNIP

Аннотация. Рассматриваются основные характеристики технологических процессов, реализуемые молочными такси, необходимость контроля основных характеристик данных процессов, а также задачи по их расширению и совершенствованию.

Ключевые слова: контроль характеристик, технологический процесс, молочные такси, питание телят, животноводство.

Abstract. The article discusses the main characteristics of technological processes implemented by dairy taxis, the need to control the main characteristics of these processes, as well as the tasks of their expansion and improvement.

Keywords: characteristics control, technological process, dairy taxis, calf nutrition, animal husbandry.

Обеспечение продовольственной безопасности Республики Беларусь на современном этапе развития общества является одной из важнейших задач. В настоящий момент сложилась мировая практика производства продуктов питания в животноводстве на молочно-товарных фермах (МТФ), при этом выращивание молодняка для увеличения и восполнения дойного стада является первоочередной задачей.

Основным видом прогрессивного современного оборудования для приготовления жидких кормовых смесей (ЖКС) и индивидуального дозированного кормления телят на МТФ являются молочные такси.

Молочные такси реализуют следующие основные технологические процессы:

- приготовление ЖКС;
- групповая доставка ЖКС для раздачи телятам;
- индивидуальная раздача ЖКС телятам.

Для технологического процесса приготовления ЖКС необходимо производить мониторинг следующих основных технологических характеристик в режиме реального времени:

- температуру окружающей среды (температуру помещения) при приготовлении ЖКС;

- температуру ЖКС;
- скалярную величину температурного градиента ЖКС;
- температуру вспомогательной технологической жидкости (ВТЖ);
- скалярную величину температурного градиента ВТЖ;
- плотность теплового потока ЖКС;
- плотность теплового потока ВТЖ;
- скалярную величину температурного градиента ЖКС в режиме пастеризации;
- температуру пастеризации;
- время пастеризации;
- число оборотов электродвигателя размешивающего устройства.

На рис. 1 представлен график технологического процесса пастеризации.

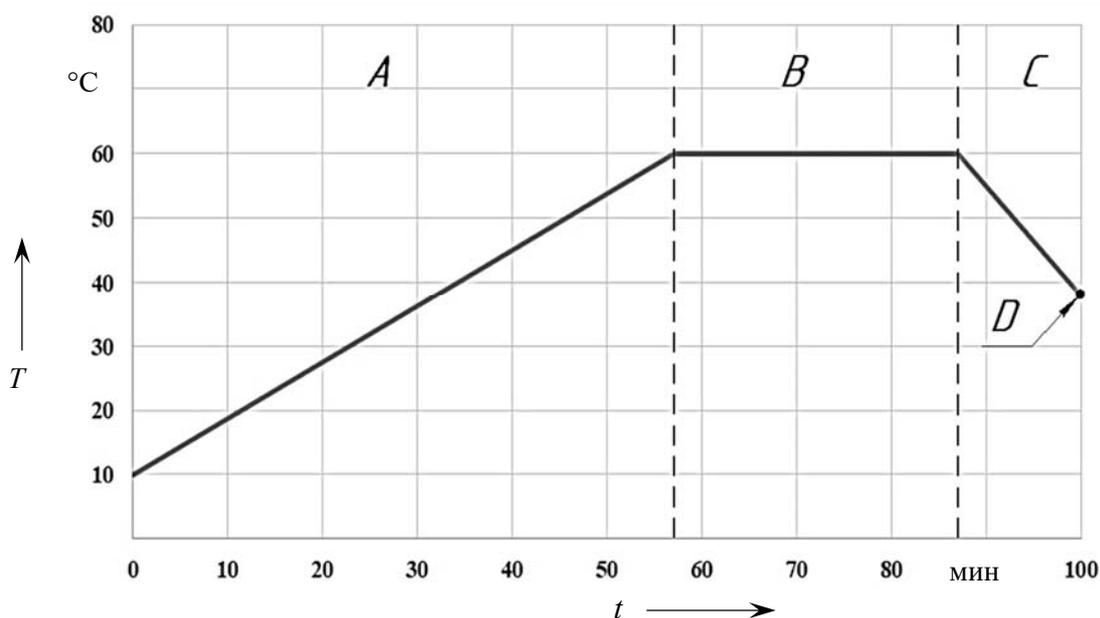


Рис. 1. График технологического процесса пастеризации

Область *A* (см. рис. 1) соответствует процессу нагрева, область *B* – процессу пастеризации, область *C* – процессу охлаждения.

Для приготовления ЖКС применяют две технологии:

- 1) использование замороженного или охлаждённого молозива;
- 2) использование сухих кормовых смесей.

При этом особенностью данных технологических процессов является большая инерционность в плане набора и снижения температуры на участках *A* и *C*, представленных на рис. 1, большая инерционность связана с большой инерционностью ЖКС и ВТЖ.

По имеющемуся оборудованию для приготовления ЖКС можно представить условную номенклатуру данных изделий по объёму ЖКС: 100, 200, 250, 300, 400 и т. д. Для обеспечения заданных температур нагрева (участок *A*, пастеризации, участок *B*) используются различные комбинации ВТЖ и сукультенов (ТЭН).

Эскиз предлагаемой обобщенной конструкции данного оборудования для приготовления ЖКС представлен на рис. 2.

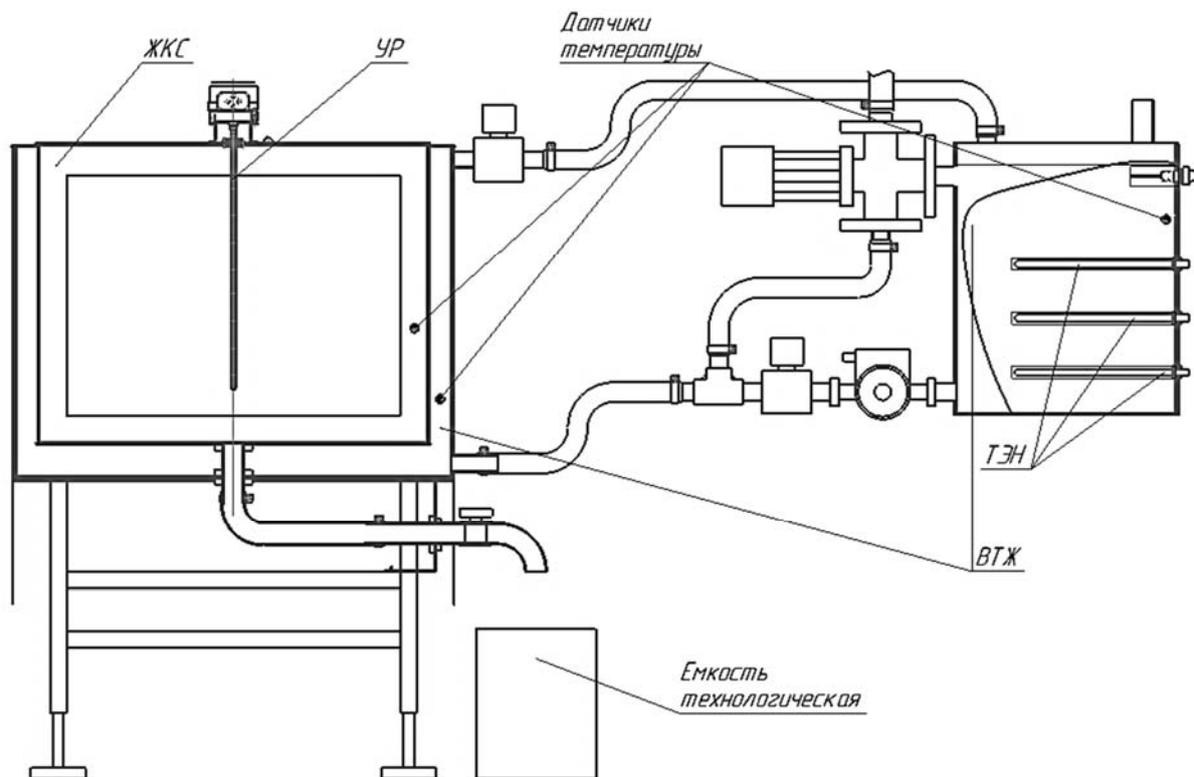


Рис. 2. Эскиз предлагаемой обобщенной конструкции оборудования для приготовления ЖКС

При достижении температуры (см. рис. 1, точка *D*) ЖКС по показателю температуры готовы для кормления телят. Однако для доставки ЖКС к индивидуальной кормушке (поилке) теленка необходимо в самых неблагоприятных случаях преодолеть расстояние 100...300 м, при этом часть пути может проходить вне помещений при температуре воздуха до минус 25 °С. В это время ЖКС может потерять заданную по технологии кормления температуру. Уменьшение температуры ЖКС происходит естественным путём, поэтому необходимо использовать в конструкции молочного такси следующие технические решения:

- тепловую изоляцию;
- систему мониторинга реального времени температуры ВТЖ;
- систему обеспечения температуры ВТЖ;
- систему обеспечения скалярного градиента температуры ВТЖ;
- систему мониторинга реального времени температуры ЖКС;
- систему обеспечения температуры ЖКС;
- систему обеспечения скалярного градиента температуры ЖКС.

Для решения данных задач используется микропроцессорная система управления (МПСУ).

МПСУ обеспечивает также режим пастеризации. Несоблюдение основных характеристик технологического процесса пастеризации в конечном итоге не даст гарантии уничтожения вредоносных бактерий и патогенов, что может привести к нарушению здоровья телят, или, в худшем случае, их гибели. На рис. 3 представлены характеристики процесса пастеризации с применением МПСУ 1 и без применения МПСУ 2 и 3.

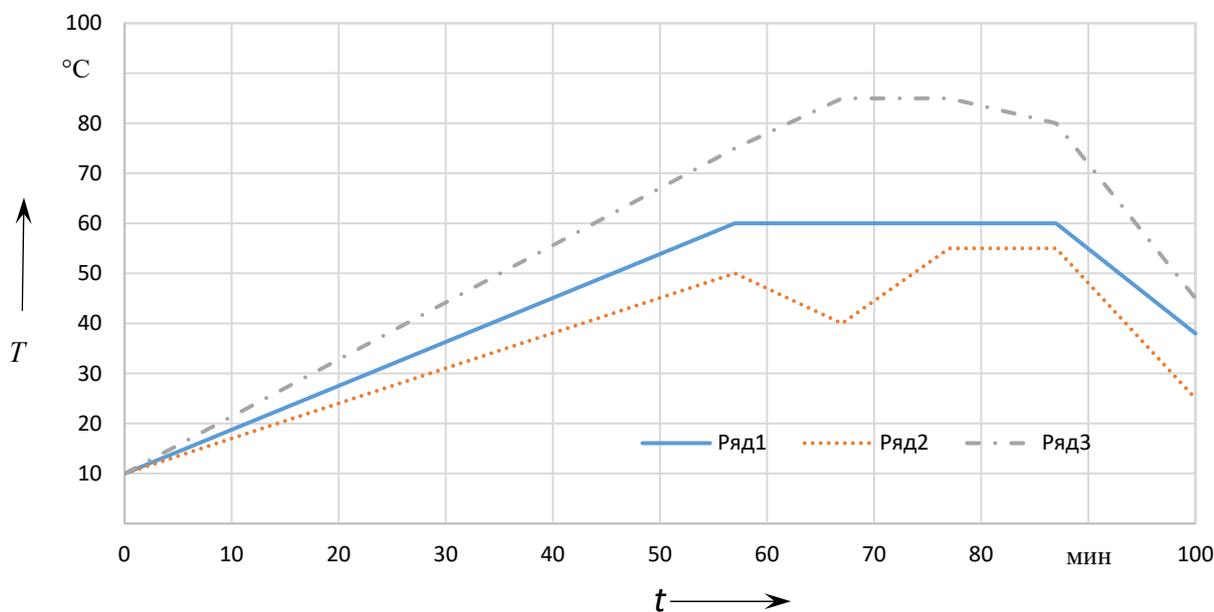


Рис. 3. Характеристики процесса пастеризации

Общемировая тенденция в животноводстве крупнорогатого скота (КРС) – использование транспортных средств, которые выполняют функцию перемещения ЖКС под управлением или без участия оператора, управления от бортового компьютера, т. е. использование молочных такси. При этом перемещения выполняются под управлением и контролем МПСУ с использованием тягового электропривода.

Электропривод должен обеспечить следующие характеристики:

- заданную скорость перемещения молочного такси из помещения, в котором производится приготовление ЖКС, к месту кормления телят на всех участках траектории движения (обобщенная скоростная характеристика движения представлена на рис. 4);

- скалярную величину градиента скорости перемещения, режим «разгон»;

- скалярную величину градиента скорости перемещения, режим «замедление, точный останов»;

- скалярную величину градиента скорости перемещения, режим «движение с постоянной скоростью»;

- заданную максимальную скорость перемещения молочного такси от места кормления телят в помещение, в котором производится приготовление ЖКС.

Для мониторинга данных основных технологических характеристик в режиме реального времени используется энкодер, а для обеспечения заданных характеристик МПСУ – силовой полупроводниковый преобразователь.

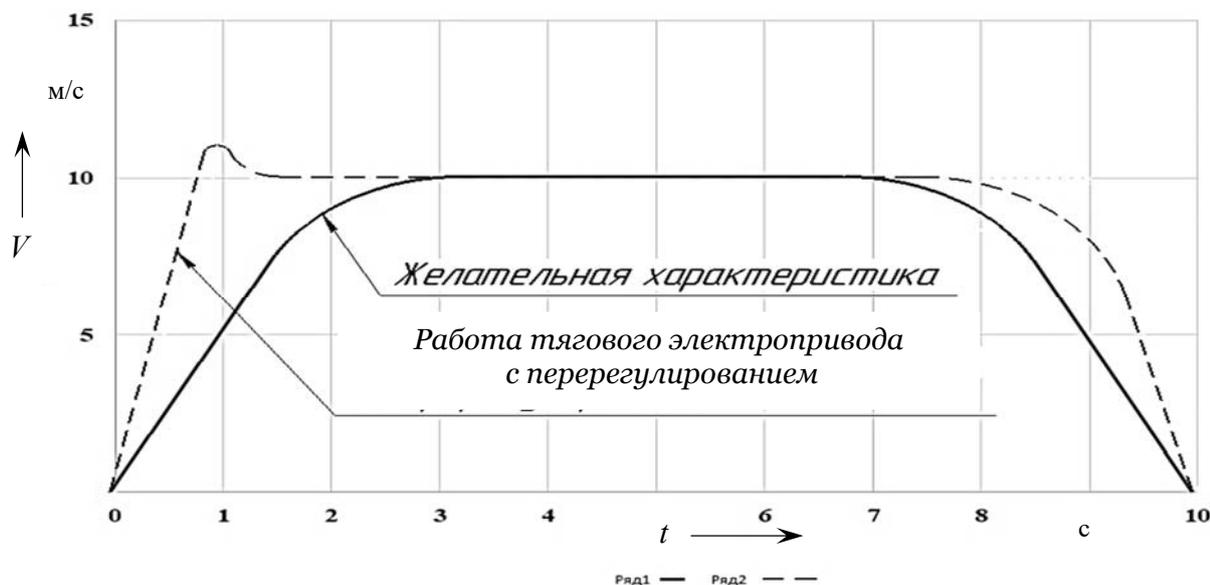


Рис. 4. Обобщённая скоростная характеристика движения молочного такси

Как видно из рис. 4, кривая разгона ряда 1 обеспечивает более плавный пуск и торможение электродвигателя нежели кривая разгона ряда 2, что достигается за счёт использования энкодера.

МПСУ обеспечивает также режим персонализации дозирования ЖКС при кормлении телят. При этом должны быть решены следующие организационные и технические задачи:

- выполнено индивидуальное чипирование телят;
- зоотехник (ветеринарный врач) определяет величину индивидуальной порции для каждого теленка, данные ежедневно (или по мере необходимости) актуализируются и заносятся в программу МПСУ;
- молочное такси (дополнительная опция) оснащается считывающим устройством;
- работник МТФ (или в ближайшем будущем бортовой робот молочного такси) производит отпуск определенной порции ЖКС.

В процессе развития и совершенствования технологических процессов на МТФ при кормлении телят необходимо выполнить реализацию следующих дополнительных сервисных опций МПСУ:

- мониторинг реального времени температуры ЖКС;
- мониторинг реального времени кормления;
- мониторинг величины порции ЖКС;
- отчет о проведенных операциях руководству сельскохозяйственного предприятия.

УДК 620.179.14

РОЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕШЕНИИ АКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ***В. П. ЛУНИН***

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 621.179.14

THE ROLE OF MATHEMATICAL MODELING IN SOLVING OF ACTUAL TASKS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL***V. P. LUNIN***

Аннотация. Анализ проблем с обеспечением эксплуатационной безопасности объектов энергетики, трубопроводного транспорта, авиации приводит к выводу о необходимости совершенствования методологии проектирования диагностических систем. Методология должна опираться на современные технологии, предусматривающие, в первую очередь, использование адекватных математических моделей процедур электромагнитного, ультразвукового, теплового, рентгеновского контроля, а также эффективных алгоритмов анализа эксплуатационных данных. Компьютерное численное моделирование дает возможность инженеру детально исследовать характер взаимодействия поля/излучения с контролируемым изделием, судить о достоинствах конкретного метода контроля и его ограничениях, выбрать наилучшие условия организации диагностической процедуры, грамотно спроектировать конструкцию преобразователя в конкретной задаче, а также обоснованно задать программу анализа сигналов и принятия решения. Роль математического моделирования продемонстрирована на решении трех актуальных задач неразрушающего контроля. Первая задача относится к использованию строгой математической модели при проектировании системы обработки данных внутритрубного магнитного дефектоскопа для контроля магистральных трубопроводов. Вторая актуальная задача – проектирование системы обнаружения и классификации дефектов теплообменных труб парогенераторов по результатам многочастотного вихретокового контроля. Третья задача – определение кривой вероятности обнаружения дефектов в сварных швах при ультразвуковом контроле с помощью фазированной решетки.

Ключевые слова: математическая модель, магнитный контроль трубопроводов, вихретоковый контроль теплообменных трубок, ультразвуковой контроль сварных швов.

Abstract. Analysis of problems with ensuring the operational safety of energy facilities, pipeline transport, and aviation leads to the conclusion that it is necessary to improve the methodology for designing diagnostic systems. The methodology should be based on modern technologies, providing, first of all, the use of adequate mathematical models of electromagnetic, ultrasonic, thermal, x-ray testing procedures, as well as effective algorithms for analyzing operational data. Computer numerical simulation enables the engineer to study in detail the nature of field/radiation interaction with the controlled product, judge the merits of a particular method of testing and its limitations, choose the best conditions for organizing diagnostic procedure, competently design of transducer in a particular task, and also reasonably set a program for analyzing signals and decision making. The role of mathematical modeling is demonstrated by solving three topical problems of nondestructive testing. The first task relates to the use of rigorous mathematical model in the design of data processing system for in-line magnetic flaw detector for monitoring main pipelines. The second urgent task is the design of a system for detecting and classifying defects in heat exchange tubes of steam generators based on the results of multifrequency eddy current testing. The third task

is to determine the probability curve for detecting defects in welds during ultrasonic testing using a phased array.

Keywords: mathematical model, magnetic testing of pipelines, eddy current testing of heat exchange tubes, ultrasonic testing of welds.

Анализ статистических данных об аварийных ситуациях на эксплуатируемых объектах повышенной опасности (нефте- и газопроводах, атомных станциях, в авиации) за последние десятилетия выявляет тенденцию к их росту, что, учитывая все возрастающее количество таких объектов, не может не вызывать обоснованного беспокойства. Поэтому существенно возросли потребности в надежных средствах определения технического состояния этих сооружений с целью оценки их надежности и оценки остаточного ресурса, что обусловлено потребностями в их более рациональном использовании и безопасности.

Противостоять тенденции роста аварийных ситуаций можно с помощью создания надежных систем неразрушающего контроля и диагностики, предназначенных для оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса оборудования путем мониторинга опасных зон и отслеживания динамики изменения параметров, свидетельствующих о происходящих изменениях в состоянии конструкционных материалов.

Усовершенствованная методология проектирования диагностических систем [1] опирается на новейшие технологии, предусматривающие, в первую очередь, использование адекватных строгих математических трехмерных моделей соответствующих процедур электромагнитного [2], ультразвукового, теплового и/или рентгеновского контроля, а также наиболее эффективных алгоритмов анализа эксплуатационных данных [3]. Компьютерное численное моделирование дает возможность инженеру детально исследовать характер взаимодействия поля/излучения с контролируемым изделием, судить о достоинствах конкретного метода контроля и его ограничениях, выбрать наилучшие условия организации диагностической процедуры, грамотно спроектировать конструкцию преобразователя в конкретной задаче, а также обоснованно задать программу анализа сигналов и принятия решения.

В задачу математического моделирования входит прогноз выходных данных исследуемой системы контроля для конкретных эксплуатационных условий. Помимо этого, математическая модель – инструмент для изучения физики взаимодействия поля (или излучения) с контролируемым изделием и помощи в обучении студентов через наглядное представление перераспределения температуры, силовых и/или эквипотенциальных линий поля, изменения амплитуды отраженного сигнала в результате изменения геометрии, свойств, появления (развития) дефекта. Модель может быть использована для проверки возможности проведения контроля тем или иным способом, прогнозирования уровня сигналов, размещения датчиков и оптимизации процедуры контроля (выбор рабочих параметров, программы сканирования объекта и т. д.). Значительна роль моделирования при исследовании влияния геометрии (размеров, формы, ориентации дефектов), характера свойств (нелинейности, анизотропии, гистерезиса) на прогнозируемые сигналы датчиков.

Пример 1 – Математическое моделирование в решении задачи проектирования системы обработки данных внутритрубного магнитного дефектоскопа [1].

Одной из актуальных проблем трубопроводного транспорта является задача обеспечения высокой эксплуатационной надежности и безопасности труб для перекачки нефти и газа. Ввиду того, что эти трубы эксплуатируются в условиях значительных механических нагрузок, нередко в контакте с агрессивными средами, выход из строя отдельных труб может привести к большим экономическим потерям от остановки эксплуатации и заражению окружающей среды. Поэтому необходимо систематически контролировать трубопроводы во время эксплуатации и вовремя принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций.

Характерной особенностью принятой методологии проектирования, ориентированной на нейросетевые алгоритмы классификации и распознавания образа [1], является то, что она использует заранее сформированную базу данных, которая должна содержать сигналы от наиболее часто встречаемых на практике дефектов, параметры которых должны варьироваться в широких пределах. Такая база данных и была создана при помощи математического моделирования путем накопления рассчитанных сигналов от возможных на практике дефектов с известными параметрами. На рис. 1 и 2 приведены рассчитанные на 3D-модели характерные сигналы – распределение осевой (см. рис. 1) и азимутальной (см. рис. 2) составляющих магнитной индукции поля над дефектом от внешней трещины, а на рис. 3 реальные сигналы дефектоскопа как от трещины, так и от коррозии.

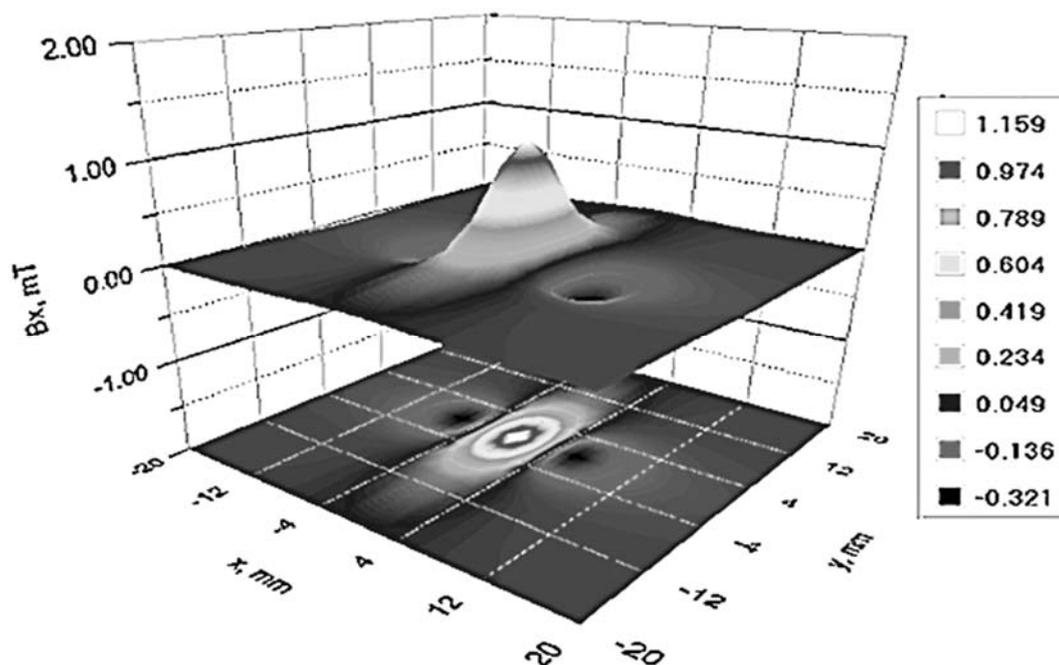


Рис. 1. Модельный сигнал от дефекта – распределение осевой составляющей магнитной индукции поля рассеяния трещины

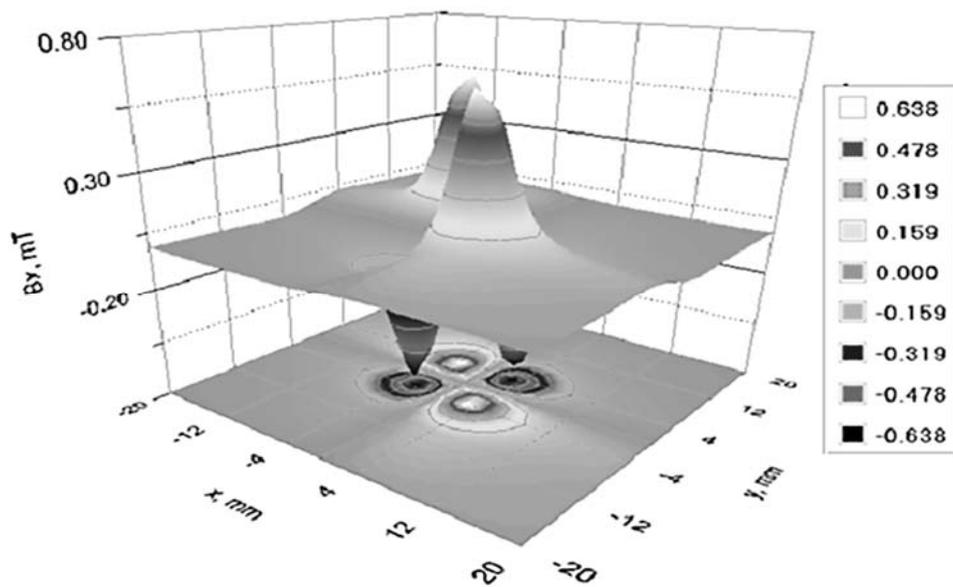


Рис. 2. Модельный сигнал от дефекта – распределение азимутальной составляющей магнитной индукции поля рассеяния трещины

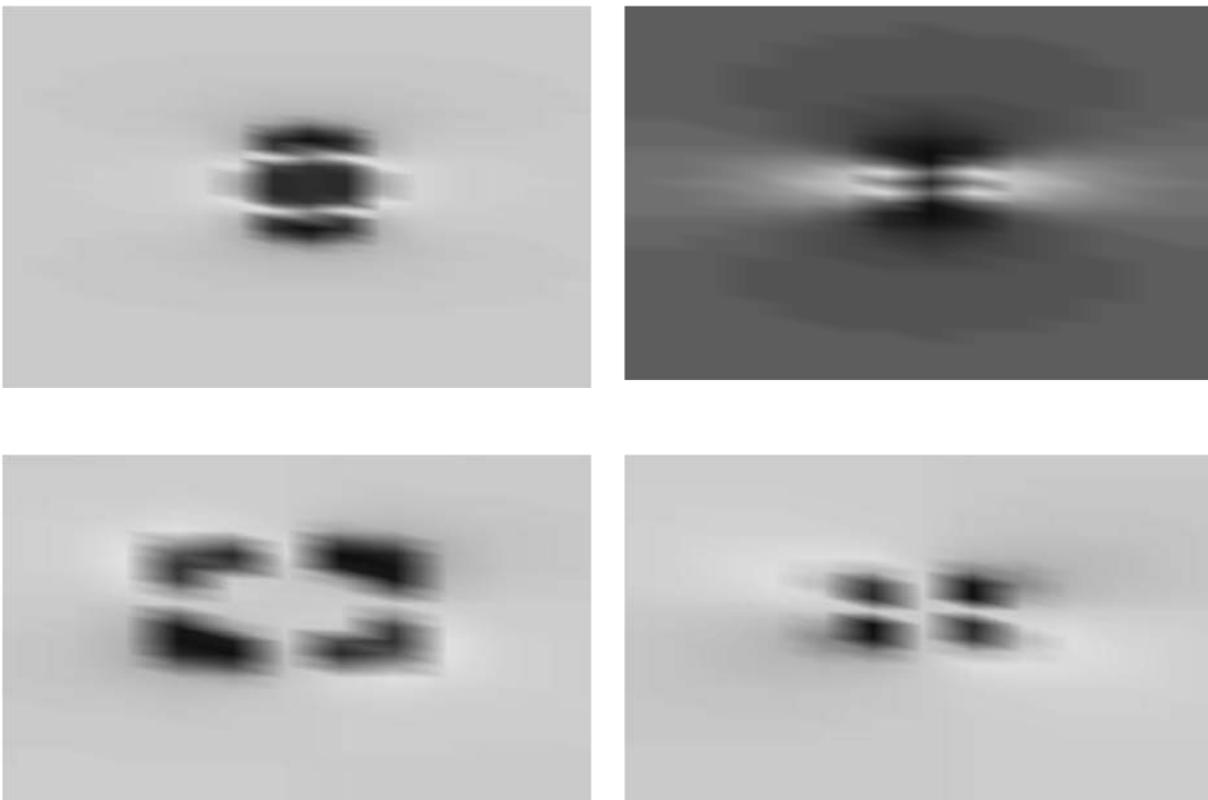


Рис. 3. Типичные реальные сигналы: осевая (вверху) и угловая (внизу) составляющие поля от дефектов типа коррозия (слева) и трещина (справа)

Подробность базы данных, т. е. шаг изменения параметров дефекта, определялась необходимой точностью оценки параметров исследуемого дефекта, а также предполагаемым уровнем погрешности измерения поля рассеяния. Вследствие того, что спектр различных конфигураций дефектов, параметры которых необходимо определять на практике, достаточно велик, а параметры этих дефектов могут изменяться, в общем случае, в очень широких диапазонах, база данных имела значительные размеры (порядка тысячи). Также следует заметить, что топография поля рассеяния зависит не только от параметров дефекта, но и от таких неинформативных влияющих (мешающих) факторов, как зазор между измерительным преобразователем и поверхностью объекта контроля (ОК), магнитные свойства материала, геометрические параметры ОК, скорости сканирования первичного преобразователя и т. д.

Обеспечить высокую достоверность результатов контроля, обусловленную значительной стоимостью самого контроля и ответственностью объекта контроля (магистрального трубопровода), а также заданные нормы точности и разрешающей способности можно лишь с помощью строгого согласования алгоритмов анализа данных с конструктивными особенностями измерительной системы, а также предусмотрев в них возможность варьирования условий эксплуатации.

В качестве (неконтролируемых) эксплуатационных факторов, сопровождающих процедуру контроля внутритрубным магнитным дефектоскопом, могут рассматриваться: изменение рабочего зазора между датчиками и внутренней поверхностью трубы в процессе движения (2...7 мм); изменение толщины стенки отдельных труб на различных участках магистрального трубопровода (толщина стенки трубы может варьироваться от 6 до 16 мм); поля намагничивания; изменение магнитных свойств ферромагнитного материала трубы в процессе длительной эксплуатации (характеристика $B(H)$ за десятки лет эксплуатации может отличаться от исходной на 20 %...40 %); влияние локальной остаточной намагниченности ферромагнитного материала в областях напряженного состояния металла; изменение скорости движения снаряда внутри трубы (от 0,5 до 4 м/с).

Для отстройки от мешающих факторов реализован один из вариантов инвариантного преобразования с использованием амплитудных признаков осевой и азимутальной составляющих магнитной индукции, измеряемых в процессе контроля трубопровода магнитным дефектоскопом, при этом вид функции преобразования одного из признаков и целевой функции подбирается, и функция преобразования другого признака строится как интерполяционная по узловым значениям с вариацией контролируемых параметров и эксплуатационного фактора в выбранном диапазоне. Показано [1], что применение разработанного метода к отстройке от изменения намагниченности и толщины трубы обеспечило уменьшение погрешности оценки глубины и эквивалентного диаметра дефектов типа коррозии в 2–2,5 раза.

Пример 2 – Проектирование системы обнаружения и классификации дефектов теплообменных труб парогенераторов по результатам много-частотного вихретокового контроля.

Этапы проектирования алгоритмического обеспечения системы много-частотного вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с помощью проходного дифференциального преобразователя, помимо создания математической (конечно-элементной) модели объектов контроля с учетом реальных электрофизических свойств элементов конструкции, включали этапы модельных исследований влияния на сигнал мешающих факторов (конструктивных элементов, помех), а также формирования банка сигналов от широкого спектра дефектов, в том числе тех, которые были реализованы в модели. Заключительные этапы предполагают разработку алгоритмов предварительной обработки сигналов (фильтрация помех, отстройка от влияния мешающих факторов), формирование набора признаков для обнаружения и параметрической оценки дефектов и, наконец, разработку автоматизированного классификатора дефектов и его настройку [1, 3, 4, 6].

К настоящему времени для решения этой важнейшей задачи атомной энергетики необходимо найти эффективный алгоритм отстройки сигнала дифференциального преобразователя от одновременного влияния совокупности эксплуатационных факторов при контроле, которыми являются:

- нередко неконтролируемая неровность (волнистость) внутренней поверхности трубки, что связано с особенностью производства теплообменных труб в России (так называемая *pilger*-проблема);

- наличие конструктивных элементов – металлических дистанционирующих решеток, причем конструкции этих решеток могут отличаться от станции к станции, стенки «горячего» и «холодного» коллекторов, а также антивибрационных решеток в районе гибов;

- наличие электропроводящих отложений, в первую очередь, на основании меди, очаги которых могут быть случайным образом расположены на внешней поверхности трубки [5];

- наличие очагов с отложениями магнетита, которые также могут образовываться в разных местах на внешней поверхности трубки.

В случае образования трещины в области конструктивного элемента (например, под краем дистанционирующей решетки) и наличия в этой же области магнетита и/или медного отложения, да еще неровность внутренней поверхности трубки, приводят к тому, что сигнал от дефекта маскируется сигналами от этих мешающих факторов и выделить информативную часть сигнала становится чрезвычайно сложно.

Кроме того, задача усложняется тем, что электрофизические характеристики как электропроводящих отложений (электропроводность), так и магнетита (магнитная проницаемость), в общем случае, неизвестны и их значения могут находиться в очень широком диапазоне.

На рис. 4 представлены полученные на 3D-математической модели действительная (вверху) и мнимая (внизу) составляющие комплексного сигнала для наиболее сложной ситуации – трещина в центре (глубина 80 % от толщины

трубки, длина 10 мм, раскрытие 20 мк) находится под краем дистанционирующей решетки (слева) в окружении медного слоя (толщиной 50 мк) и магнетита (над медью толщиной 0,5 мм), отложения расположены справа от центра.

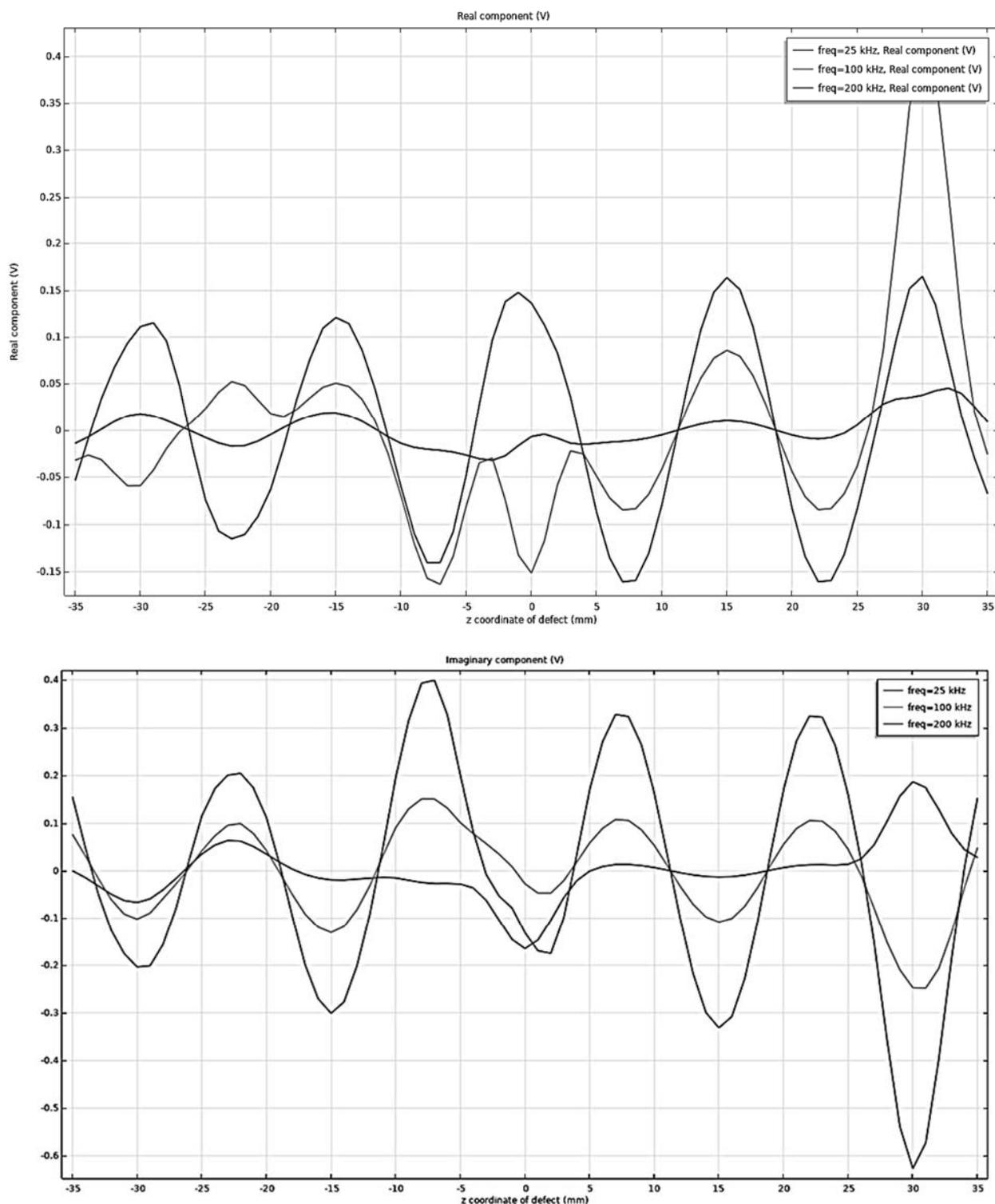


Рис. 4. Действительная (вверху) и мнимая (внизу) составляющие рассчитанного на модели комплексного сигнала от трещины (в центре), дистанционирующей решетки (слева от центра), отложений меди и магнетита (справа от центра) при наличии максимального pilger-шума

Влияние *rilger*-шума смоделировано изменением формы внутренней поверхности по всей длине синусоидой с амплитудой 100 мк (наибольшая волнистость, встречающаяся на практике) и периодом 15 мм (половина длины решетки).

Пример 3 – Расчет кривой вероятности обнаружения дефектов с помощью численного моделирования процедуры ультразвукового контроля сварных соединений в авиационной и космической отрасли с применением фазированной акустической решетки (ФАР) и с учетом мешающих факторов [7]. Рассмотрен случай контроля плоских дефектов типа непровара и трещины в корне шва с помощью секторного сканирования. По результатам моделирования найдена условная высота трещин по уровню в 10 % от опорного сигнала. По результатам численных экспериментов рассчитаны кривые вероятности обнаружения дефектов.

Для контроля плоских дефектов в сварных швах малой толщины используют наклонные преобразователя ФАР частотой от 5 до 10 МГц с количеством элементов от 8 до 16. Для моделирования был выбран преобразователь 10L32-A1 с призмой SA1-N60S-IHC фирмы R/D Tech, входящий в комплект поставки дефектоскопа на ФАР OmniScan MX.

В качестве дефектов рассмотрены трещины различного размера (глубины) – от 0,125 до 5 мм с шагом 0,125 мм, направленные под углом 90° относительно плоскости донной поверхности. Путем деления на разнонаправленные секции геометрия трещины была приближена к реальной и создавалась случайным образом.

Решалась задача во временной области, геометрия модели приведена на рис. 5.

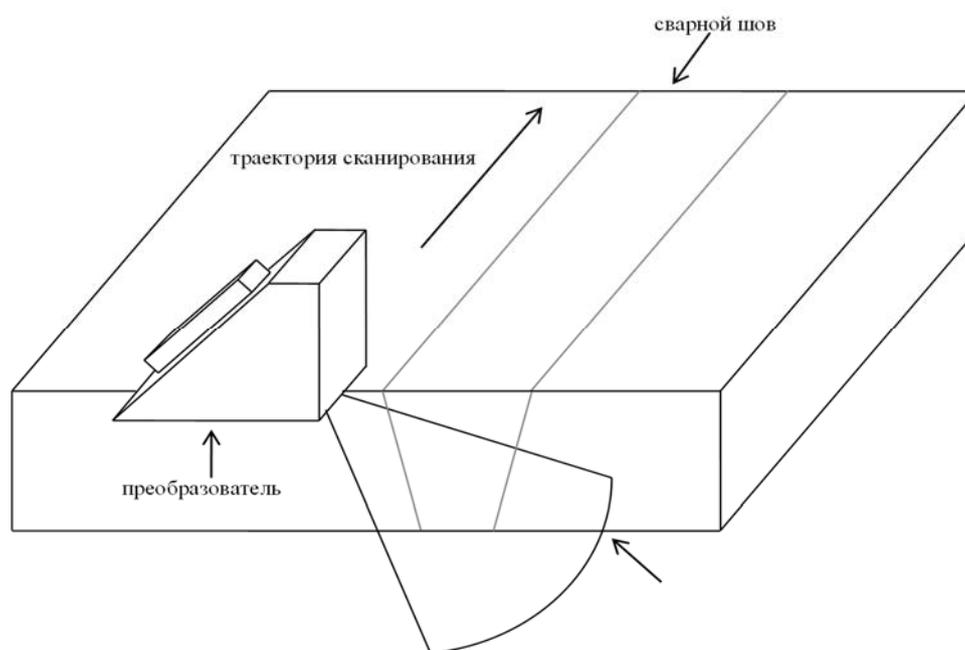


Рис. 5. Перемещение преобразователя ФАР при сканировании объекта при контроле сварного шва

Преобразователь расположен таким образом, чтобы при секторе сканирования от 30° до 60° трещина оказалась полностью «прозвучена».

Для получения выходного сигнала в каждый момент времени расчета производилось интегрирование значения давления по площади пьезопластины. Полученные сигналы складывались со сдвигом, имитируя фокусировку и изменение угла ввода, формируются А-сканы для различных углов ввода. Таким образом, было реализовано секторное сканирование от 30° до 60° с шагом в 1° , фокусировка производилась на глубину 10 мм.

На рис. 6 представлены примеры модельных акустических изображений трещин, полученные в ходе расчетов на модели.

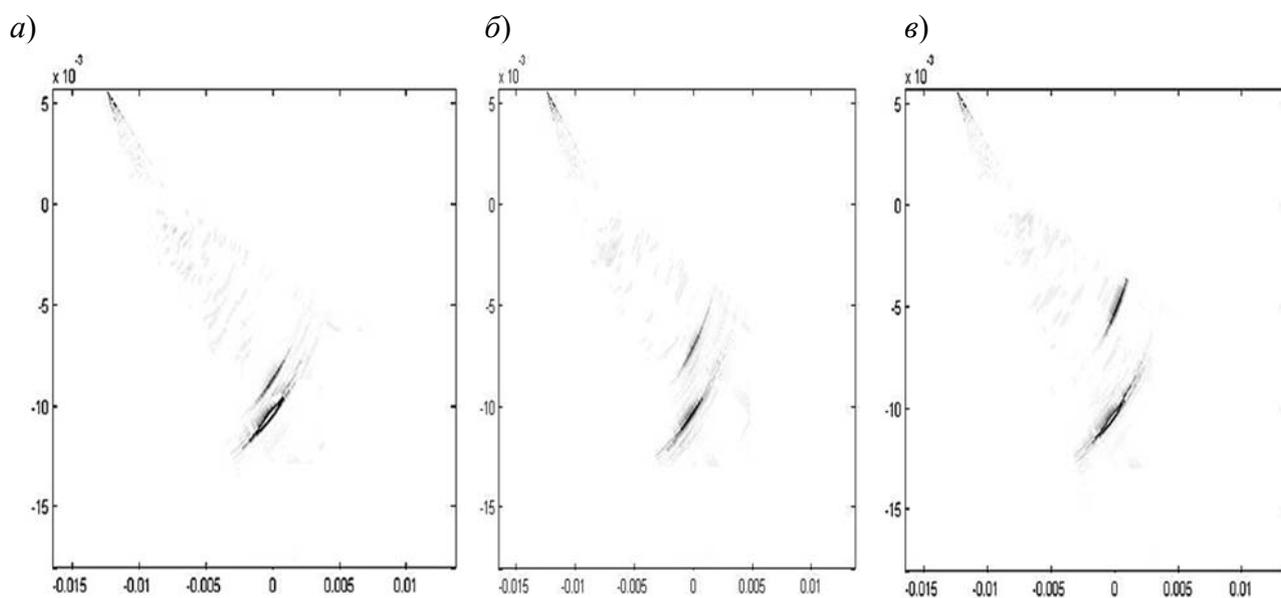


Рис. 6. Примеры акустических изображений трещин глубиной 1,625 мм (а), 3,250 мм (б) и 5,000 мм (в)

Заключение. Роль математического моделирования продемонстрирована на решении трех актуальных задач неразрушающего контроля. Первый пример относится к использованию строгой математической модели при проектировании системы обработки данных внутритрубного магнитного дефектоскопа для контроля магистральных трубопроводов. Второй пример продемонстрировал возможности математического моделирования при проектировании системы обнаружения и классификации дефектов теплообменных труб парогенераторов по результатам многочастотного вихретокового контроля. Третий пример использования численного моделирования – при реализации способа расчета кривой вероятности обнаружения дефектов для случая ультразвукового контроля с применением фазированной решетки в сварных швах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лунин, В. П.** Проектирование программно-алгоритмических средств для систем электромагнитного контроля энергетического оборудования / В. П. Лунин. – Москва: МЭИ, 2016. – 196 с.
2. Программа конечно-элементного моделирования MagNum3D: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / В. П. Лунин, А. Г. Жданов. – № 2007611345. – Оpubл. 28.03.2007.
3. **Лунин, В. П.** Алгоритмическое обеспечение для надежного выявления дефектов теплообменных труб / В. П. Лунин, А. Г. Жданов // Вестн. МЭИ. – 2015. – № 2. – С. 114–122.
4. Предэксплуатационные испытания программы PIRATE на выявление и оценку глубины дефектов теплообменных труб парогенераторов АЭС / А. Г. Жданов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2020. – № 8. – С. 29–36.
5. Выявление и оценка объема отложений на теплообменных трубках парогенераторов АЭС по эксплуатационным данным штатного вихретокового контроля / А. А. Столяров [и др.] // Теплоэнергетика. – 2020. – № 2. – С. 62–71.
6. **Лунин, В. П.** Перспективы использования цифровых моделей для решения актуальных задач в атомной энергетике / В. П. Лунин, А. Г. Жданов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 7 Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сент. 2020 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 106–113.
7. **Пилюгин, С. О.** Определение кривой вероятности обнаружения дефектов в сварных швах при ультразвуковом контроле фазированной решеткой / С. О. Пилюгин, В. П. Лунин // Дефектоскопия. – 2016. – № 6. – С. 35–41.

E-mail: LuninVP@mpei.ru.

УДК 620.179.147

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТА ТИПА ТРЕЩИНА В ПАРОГЕНЕРАТОРНЫХ ТРУБАХ***В. П. ЛУНИН, М. С. ДОБРОКЛОНСКАЯ***

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 620.179.147

ESTIMATION OF PROBABILITY OF DETECTING A CRACK TYPE DEFECT IN STEAM GENERATOR TUBES***V. P. LUNIN, M. S. DOBROKLONSKAYA***

Аннотация. Одной из наиболее актуальных проблем атомной энергетики является задача обеспечения высокой эксплуатационной надежности и безопасности элементов ядерных энергетических установок, в частности, теплообменных труб парогенераторов атомных электростанций. Одним из важнейших параметров, который может повлиять на оценку риска аварий, является количественная оценка достоверности и надежности вихретокового контроля, которая выполняется путем определения кривых вероятности обнаружения (Probability of Detection, PoD) дефектов. Экспериментальное определение кривых PoD требует большого количества испытательных образцов с реальными и/или реалистичными дефектами для получения надежных результатов, что делает этот процесс сложной и трудоемкой задачей. В соответствии с ГОСТ Р 50.04.07–2018, в работе проведена оценка показателей достоверности контроля через расчет кривых PoD с помощью адекватной численной модели для наиболее типичного дефекта теплообменных труб – стресс-коррозионной трещины. На трехмерной конечно-элементной модели рассчитаны сигналы от 125 вариантов реализации геометрии трещины на трех частотах. Полученные данные использованы для построения кривых PoD на каждой из частот. Отмечается, что с точки зрения достоверности предпочтительнее использовать частоту 200 кГц.

Ключевые слова: вероятность обнаружения дефектов, многочастотный вихретоковый контроль, конечно-элементное моделирование, стресс-коррозионная трещина.

Abstract. One of the most urgent problems for nuclear power is the task of ensuring high operational reliability and safety of nuclear power plants elements, in particular, steam generator heat exchange tubes of nuclear power plants. One of the most important parameters that can affect the assessment of the risk of accidents is the quantitative assessment of the reliability of eddy current testing, which is performed by determining the curves of the probability of detection (Probability of Detection, PoD) of defects. Experimental determination of PoD curves requires a large number of test samples with real and/or realistic defects to obtain reliable results, which makes this process very difficult and time-consuming task. In accordance with GOST R 50.04.07–2018, the work assessed the reliability indicators of testing through the calculation of PoD curves using an adequate numerical model for the most typical defect in heat exchange pipes – a stress corrosion crack. On a three-dimensional finite element model, the signals from 125 variants of the implementation of the fracture geometry at three frequencies were calculated. The obtained data were used to plot PoD curves at each of the frequencies. It is noted that from the point of view on reliability, it is preferable to use a frequency of 200 kHz.

Keywords: probability of detecting defects, multifrequency eddy current testing, finite element modeling, stress-corrosion cracks.

Введение. Сегодня очень актуален вопрос безопасности и надежности атомной энергетики, т. к. развитие этой отрасли одно из основных условий обеспечения энергонезависимости государства. Увеличение числа атомных электростанций (АЭС) и размещение их в районах с высокой плотностью населения требует высокого уровня надежности оборудования. Парогенератор (ПГ) на АЭС является составной частью циркуляционной петли ядерной паропроизводящей установки и относится к изделиям первого класса безопасности.

Чтобы обеспечить экономическую эффективность, парогенераторы АЭС вынуждены работать в очень напряженных режимах, теплообменные трубы (ТОТ) эксплуатируются в условиях больших перепадов давления, высоких рабочих температур и значительных механических нагрузок. При эксплуатации парогенераторов на ТОТ образуются дефекты, которые могут стать причиной разгерметизации первого контура АЭС. Поэтому необходимо систематически контролировать ТОТ во время эксплуатации и вовремя принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций.

В технических требованиях на методику [1] количественные требования к задаваемой достоверности неразрушающего контроля должны содержать, в частности, численную оценку вероятности выявления дефектов применительно к конкретным типам и размерам дефектов.

Многочастотный вихретоковый метод на сегодня практически безальтернативный способ диагностики ТОТ, который предполагает контроль изнутри трубы при сканировании дифференциальным аксиальным преобразователем внутренней поверхности трубы и считывание сигналов через каждые 0,2...1,0 мм [2].

Характеристическим параметром дефекта, подлежащего выявлению с использованием стандартной методики вихретокового контроля ТОТ, является его глубина, выражаемая в процентах от толщины стенки трубки (1,5 мм). По глубине трещины определяется степень ее опасности и принимается решение о глушении трубки. Согласно стандартной методике, основным информативным параметром для определения глубины дефекта является угол наклона годографа соответствующего сигнала, для чего предварительно строится калибровочная характеристика для всех рабочих частот на основе сигналов, полученных на специальном калибровочном образце (рис. 1).

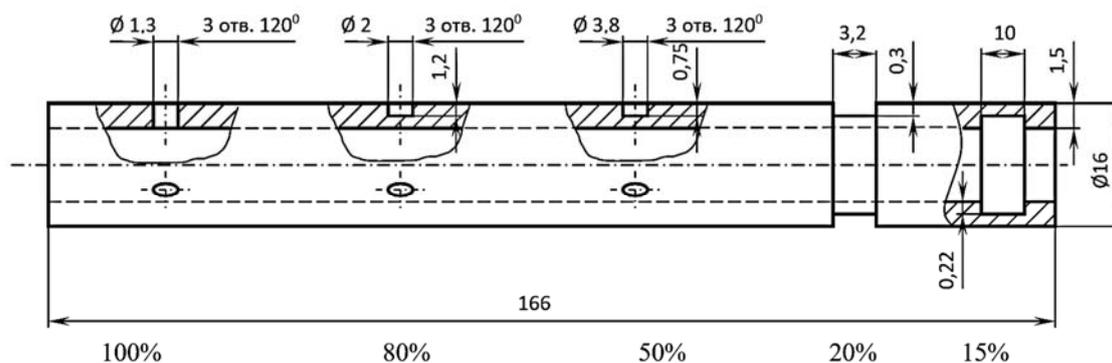


Рис. 1. Схема расположения дефектов на калибровочной трубке

Калибровочный образец – это трубка из такой же аустенитной стали, что и реальные теплообменные трубки. На нее нанесены пять калибровочных отверстий (по три в каждом сечении, расположенных под углом 120° по отношению друг к другу): три внешних сверления глубиной 50 %, 80 % и 100 % от толщины стенки трубки, одна внешняя проточка глубиной 20 % и одна внутренняя проточка глубиной 10 %.

Нормировка и калибровка выполняется в соответствии с методикой для многочастотного метода на частотах 25, 100 и 200 кГц, при этом угол наклона годографа от сквозного дефекта на каждой частоте принимается равным 40° , а амплитуда сигнала – 10 В. В соответствии с этими опорными параметрами проводят аффинную коррекцию амплитуд и углов наклона годографов сигналов остальных калибровочных дефектов.

Постановка задачи. До 95 % всех выявляемых дефектов располагаются на внешних стенках ТОТ, а преобладающим типом дефекта является стресс-коррозионная трещина. Чтобы построить качественную кривую вероятности обнаружения [3], нужно провести большое количество экспериментов с реальными дефектами, с искусственными (выполненными в лабораторных условиях) дефектами, а также, по возможности, проанализировать многолетние архивные данные.

В работе реализован подход, опирающийся на использование при расчетах сигналов адекватной математической модели на базе метода конечных элементов. Это позволяет в процессе имитационного моделирования использовать расчеты для решения задачи определения наиболее сложных для выявления дефектов из числа приведенных в технических требованиях, в частности, трещин со сложным геометрическим профилем, а также выявить их влияние в наихудших дефектных ситуациях. Наиболее интересны случаи, когда контролируемые дефекты с одинаковой глубиной имеют разброс по другим параметрам (по длине, раскрытию, по форме).

Выбор параметров моделей. В рамках работы для создания конечно-элементных трехмерных моделей использовался пакет COMSOL Multiphysics. Поскольку задачи трехмерные, расчет каждого из вариантов занимал порядка 5...8 ч. Предварительно была смоделирована ситуация с контролем калибровочной трубки и сопоставлены прогнозируемые (расчетные) сигналы от всех дефектов на трех разных частотах с экспериментальными сигналами, полученными на реальной вихретоковой установке. После операций нормировки и калибровки максимальная разница в угле наклона годографов сигналов составила 4° .

Моделирование каждого дефекта типа трещина проводилось для трех частот, пяти глубин (20 %, 40 %, 60 %, 80 % и 100 % от толщины стенки) и пяти длин (протяженности вдоль оси – 2, 4, 6, 8 и 10 мм). Были выбраны три геометрические формы профиля трещины для моделирования – прямоугольная, треугольная и равнобедренная трапеция с тремя вариантами наклона ребер – 30° , 45° и 60° (рис. 2).

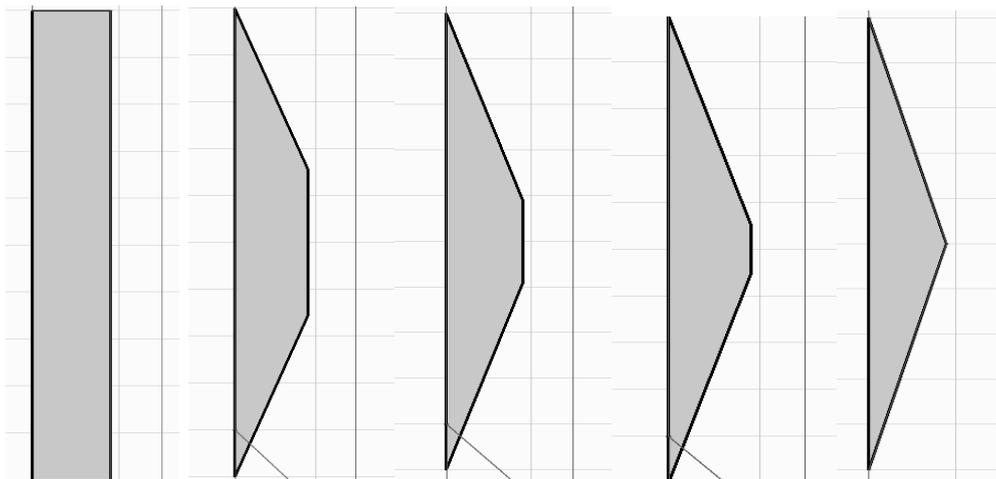


Рис. 2. Различные профили модельных трещин одинаковой глубины

Построение кривых вероятности обнаружения. Для расчета графиков вероятности обнаружения дефектов была использована программа mh1823, использующая так называемый метод a-vs-ahat (алгоритм численного отклика) [4] и уже опробована нами в решении подобных задач для ультразвукового контроля [5]. На основании полученных модельных данных для групп дефектов типа трещина с фиксированной глубиной, но имеющих разброс по длине и по форме профиля, программой были построены кривые вероятности обнаружения этих дефектов отдельно для каждой из частот 25, 100 и 200 кГц. На каждом из фрагментов (рис. 3) слева приведены исходные данные для получения коэффициентов линейной регрессии, а справа – рассчитанные кривые PoD. Анализ полученных кривых вероятности PoD для разных частот указывает на то, что с точки зрения достоверности обнаружения трещин некоторое предпочтение следует отдать контролю на частоте 200 кГц. По стандартной методике основной частотой является 100 кГц.

Заключение. Трещины могут образовываться как на открытых участках труб, так и располагаться в окружении других металлических объектов, которые искажают сигнал преобразователя. В первую очередь, это конструктивные элементы (дистанционирующие и антивибрационные решетки), дающие сигналы, которые маскируют сигналы от дефектов, а также эксплуатационные факторы, которые сопровождают процесс получения данных, при этом эти факторы нередко трудно контролируем (например, отложения с содержанием меди и/или магнетита). Поэтому следующим этапом в исследованиях, направленных на количественную оценку достоверности вихретокового контроля ТОТ парогенераторов АЭС, станет этап получения кривых PoD для случаев наихудших дефектных ситуаций, когда дефект (трещина) находится, например, под дистанционирующей решеткой в окружении магнетитного отложения. Подобные задачи невозможно решать без эффективных цифровых моделей [6].

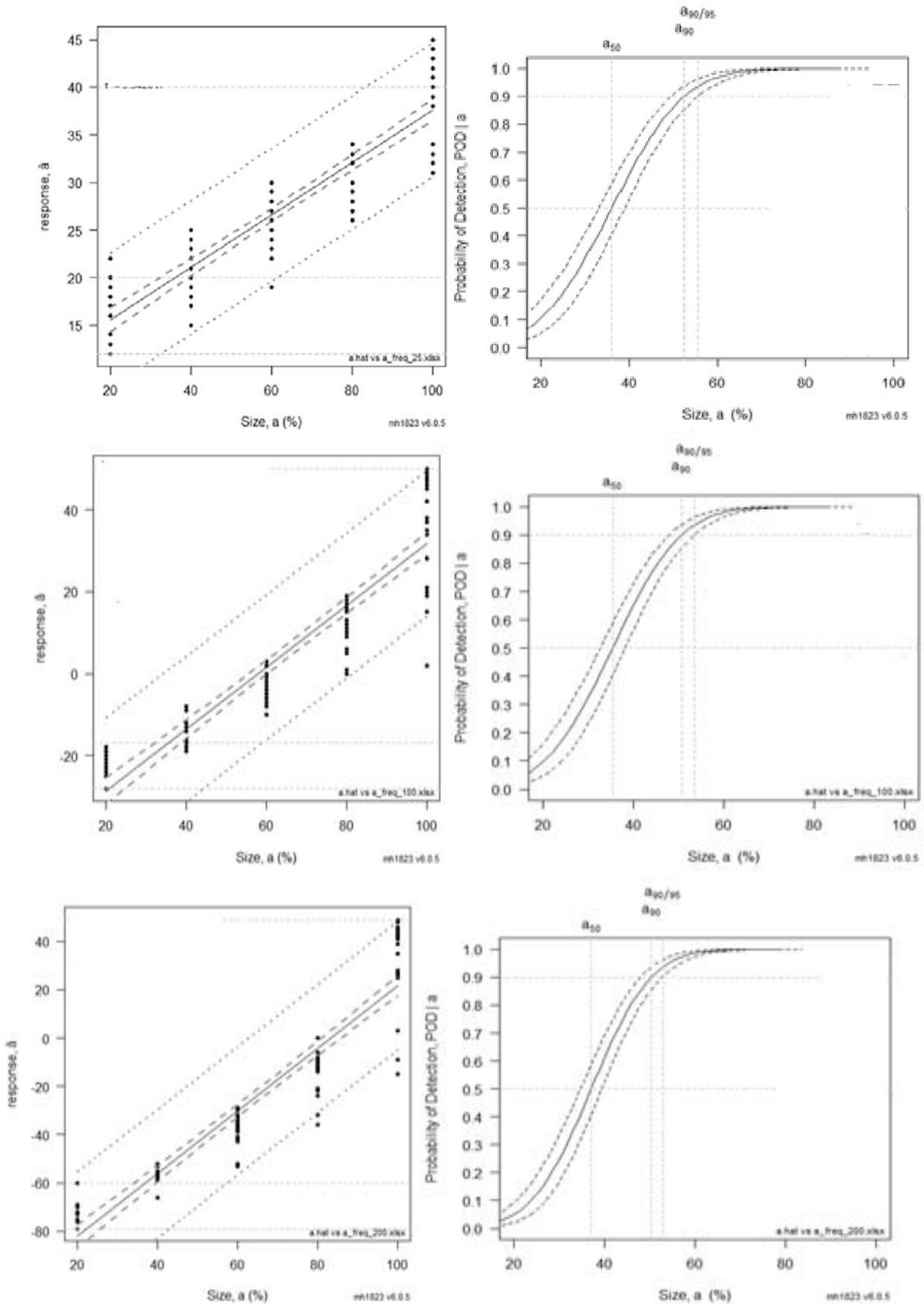


Рис. 3. Данные для расчета коэффициентов регрессии (слева) и кривые PoD (справа) для 25 кГц (вверху), 100 кГц (посередине) и 200 кГц (внизу)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ 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. – 35 с.
2. **Лунин, В. П.** Проектирование программно-алгоритмических средств для систем электромагнитного контроля энергетического оборудования / В. П. Лунин. – Москва: МЭИ, 2016. – 196 с.
3. Detection of ODS/CC in SG tubes depending on the size of the crack and on the presence of sludge deposits / Hansub Chung [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 46, iss. 6. – P. 869–874.
4. Режим доступа: <http://StatisticalEngineering.com/mh1823>.
5. **Пилюгин, С. О.** Определение вероятности обнаружения дефектов в сварных швах при ультразвуковом контроле фазированной решеткой / С. О. Пилюгин, В. П. Лунин // Дефектоскопия. – 2016. – № 6. – С. 35–41.
6. **Лунин, В. П.** Перспективы использования цифровых моделей для решения актуальных задач в атомной энергетике / В. П. Лунин, А. Г. Жданов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 7 Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сент. 2020 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 106–113.

E-mail: LuninVP@mpei.ru, m.dobro42@gmail.com.

УДК 620.179.14

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ***В. П. ЛУНИН, М. А. КОМЯГИН***

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 620.179.14

DESIGN OF PULSED EDRY CURRENT PROBE FOR TESTING OF MULTILAYER PRODUCTS***V. P. LUNIN, M. A. KOMIAGIN***

Аннотация. Неразрушающий контроль состояния конструкций летательных аппаратов имеет важное значение в авиационной промышленности. Импульсный вихретоковый (ИВТ) метод активно используется для инспектирования многослойных металлических конструкций, в частности, крыла самолета, где дефекты, вызванные усталостью металла, как правило, возникают во внутренних слоях. Такие дефекты практически невозможно обнаружить с помощью традиционных методов контроля, таких как классический вихретоковый или ультразвуковой. Наличие дефектов в алюминиевых конструкциях ИВТ-методом определяется по характеру изменения сигнала приемной катушки во времени (отклика) от контролируемого изделия от поля, созданного импульсом напряжения на входной катушке. В работе проведен ряд численных (конечно-элементных) исследований потенциальных вариантов реализации контроля многослойных алюминиевых конструкций (0,4...4 мм) с помощью накладного преобразователя. Это позволило оценить влияние зазора и магнитной проницаемости используемого ферритового сердечника, а также обосновать выбор некоторых параметров спроектированного преобразователя, влияющих на результат в ходе выполнения контроля: число витков возбуждающей катушки, длину сердечника. Кроме того, на конечно-элементной модели удалось получить подтверждение экспериментально полученным зависимостям сигнала при использовании ИВТ-метода на реальных алюминиевых конструкциях с дефектами.

Ключевые слова: многослойные алюминиевые конструкции, импульсный вихретоковый контроль, проектирование преобразователя, конечно-элементная модель.

Abstract. Non-destructive testing of aircraft structures' condition is of great importance in the aviation industry. The pulsed eddy current (PEC) method is actively used to inspect multilayer metal structures, in particular, aircraft wings, where defects caused by metal fatigue, as a rule, occur in the inner layers. Such defects are almost impossible to detect using traditional inspection methods such as classical eddy current or ultrasonic testing. The presence of defects in aluminum structures by PEC method is determined by the nature of change in receiving coil signal in time (response) from testing sample from the field created by voltage pulse on the input coil. In this work, a number of numerical (finite element) studies of potential options for implementing the testing of multilayer aluminum structures (0,4...4 mm) using an attached transducer were carried out. This made it possible to evaluate the effect of the gap and magnetic permeability of the ferrite core used, as well as to justify the choice of some parameters of designed transducer that affect the result during the test: the number of turns of the exciting coil, the length of the core. In addition, on the finite element model, it was possible to obtain confirmation of experimentally obtained dependences of signal when using PEC method on real aluminum structures with defects.

Keywords: multilayer aluminum structures, pulsed eddy current testing, transducer design, finite element model.

Импульсный вихретоковый (ИВТ) метод является относительно новым методом контроля, который использует импульсное возбуждение тока одной катушки, что вызывает переходный электромагнитный процесс с откликом в приемной катушке. Регистрируемый выходной сигнал зависит как от электрофизических и геометрических параметров контролируемого проводящего изделия, так и от дефектов различных форм и размеров, которые могут быть расположены достаточно глубоко внутри объекта, в частности, во внутренних слоях многослойных алюминиевых конструкций летательных аппаратов. Такие дефекты трудно обнаружить с помощью традиционных методов, таких как классический вихретоковый контроль или ультразвуковой [1, 5, 6].

Повышенное внимание к ИВТ-методу обусловлено его ключевыми потенциальными преимуществами. Первое и главное преимущество заключается в том, что по сравнению с одночастотным ВТК-методом контроля, ИВТ-метод по своей сути имеет широкий диапазон частот, что выгодно использовать для интерпретации результатов контроля на основе вихревых токов из-за частотно-зависимого скин-эффекта. Другим преимуществом является то, что сигналы ИВТ-метода, изменяющиеся во времени, относительно легче интерпретировать, в то время как для интерпретации обычных сигналов ВТК-метода, которые представлены в виде импеданса на комплексной плоскости, требуются особые навыки оператора.

Цель работы – с помощью численной конечно-элементной модели спроектировать импульсный вихретоковый преобразователь для контроля многослойных металлических (в частности, алюминиевых) структур, широко применяемых в авиационной отрасли.

В работе были использованы как двумерная (2D), так и трехмерная (3D) модели в зависимости от геометрии образца, а также формы и положения искусственного дефекта относительно преобразователя. Например, двумерная осесимметричная модель использовалась для моделирования случая бездефектного образца, когда изучалось влияние зазора, электрофизических и/или количественных параметров элементов конструкции преобразователя и контролируемого образца. В случае же с исследованием влияния произвольного по форме и расположению дефекта бралась трехмерная модель. Модели были воспроизведены для различного количества пластин, варьирующегося от 0 (сигнал «без образца») до 10, каждая толщиной 0,4 мм.

На рис. 1 показана конструкция проектируемого преобразователя, содержащая многовитковую возбуждающую катушку и приемную с относительно длинным ферромагнитным сердечником. На рис. 2 приведен результат расчета соответствующей численной двумерной модели процедуры контроля 5-слойной алюминиевой пластины – распределение φ компоненты плотности тока в момент времени, соответствующий пику амплитуды сигнала измерительной катушки. По изменению во времени этой картины можно судить о физике изучаемого явления – переходного электромагнитного процесса в импульсном режиме. Это

дает наглядное представление о вихревых токах, проникающих внутрь проводящих пластин.

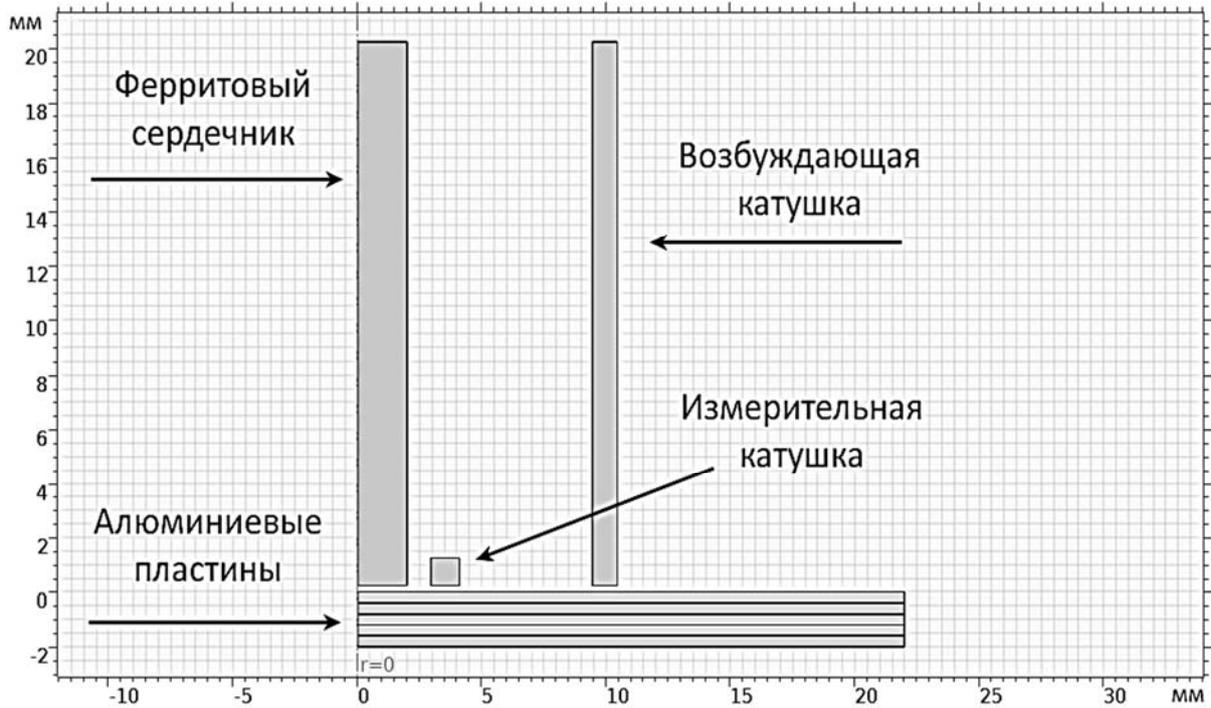


Рис. 1. Осесимметричная (2D) модель проектируемого преобразователя

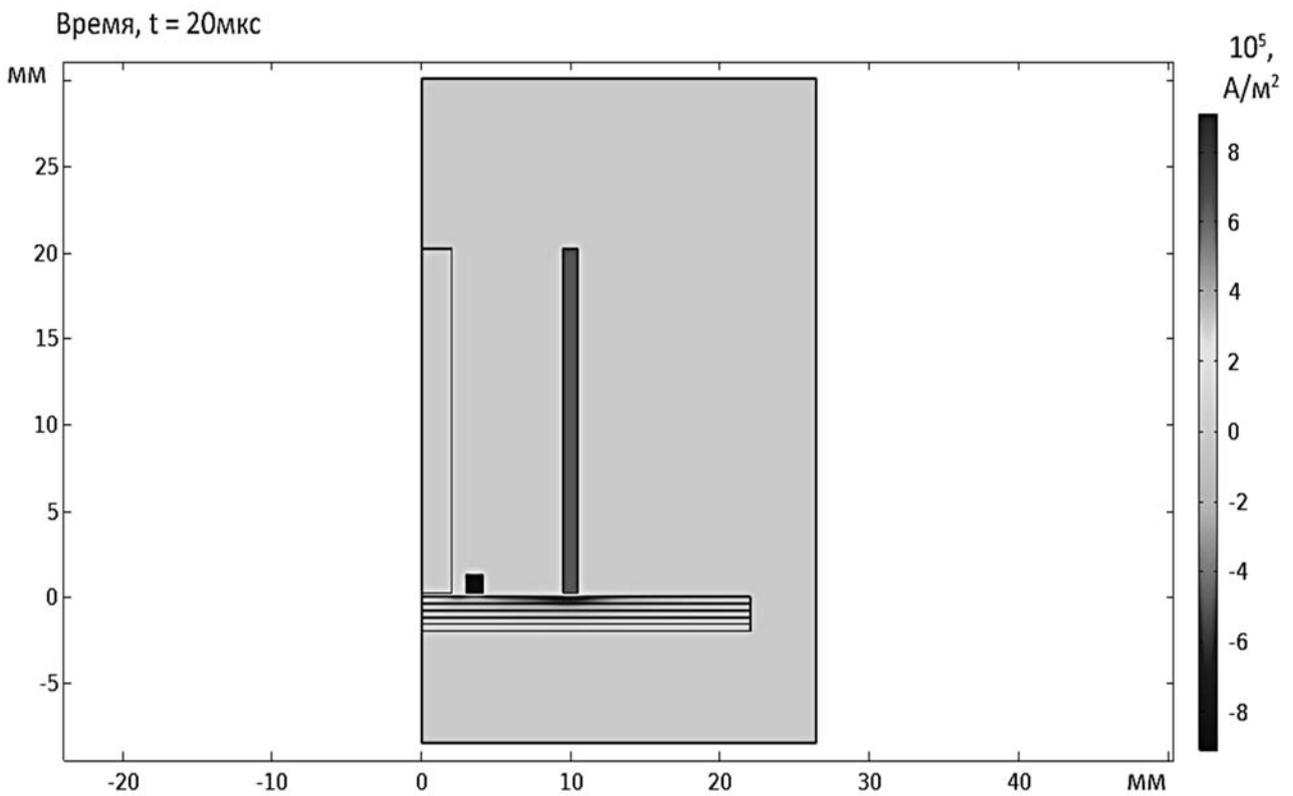


Рис. 2. Распределение ϕ составляющей плотности тока в момент времени достижения максимума приемного сигнала

Типичная форма выходного сигнала приемной катушки приведена на рис. 3, при этом число витков возбуждающей катушки принималось равным 400, 800 и 1600. Для возбуждающей катушки с наименьшим числом витков сигнал имеет наибольшую амплитуду, но и затухает с большей скоростью. Это объясняется соотношением омического и индуктивного сопротивлений первичной цепи, где индуктивность играет доминирующую роль. Для возбуждающей катушки с 1600 витками сигнал имеет наибольшее время релаксации, но и меньшую амплитуду сигнала измерительной катушки. В преобразователе был реализован компромиссный случай – выбран вариант с 800 витками.

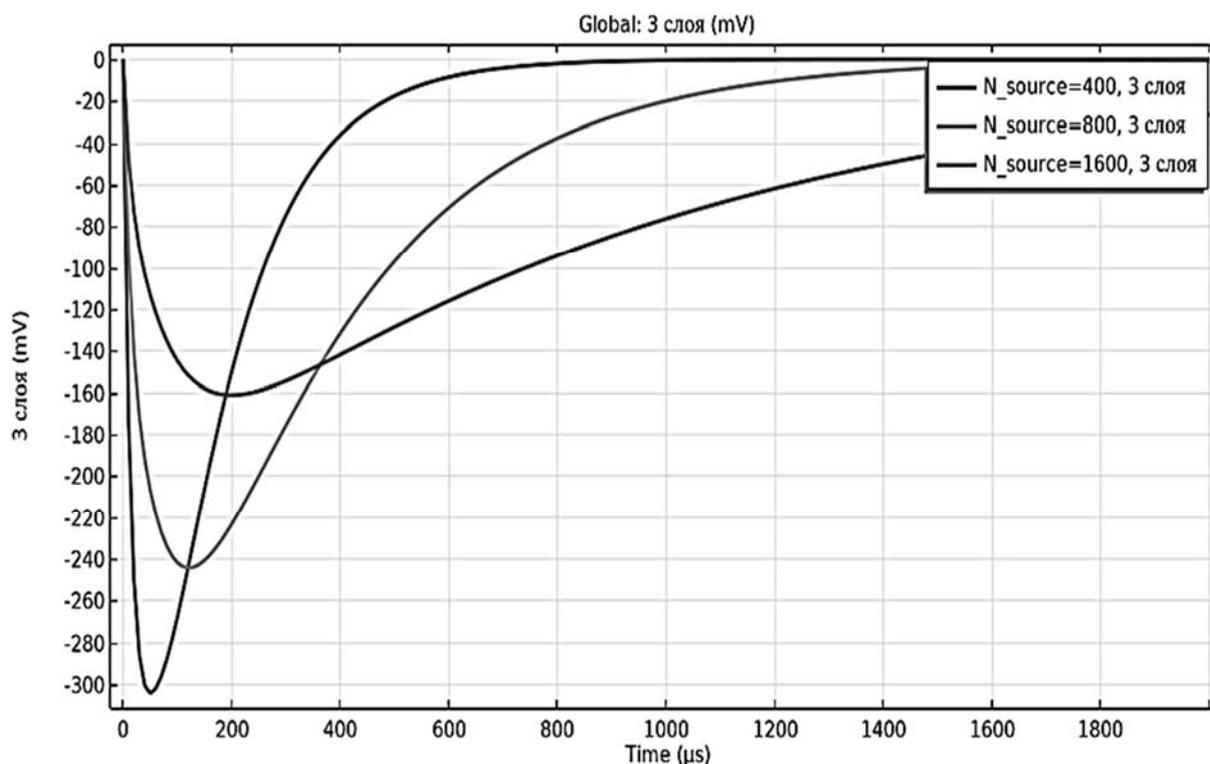


Рис. 3. Исследование влияния числа витков возбуждающей катушки на выходной сигнал

Сравнивались сигналы на выходе преобразователя для трех различных длин сердечника (10, 20 и 30 мм). Сигнал увеличился примерно на 8 % при изменении длины сердечника с 10 до 20 мм и примерно на 5 % с 20 до 30 мм. Более длинные сердечники генерируют поток, который может проникать глубже в образец и создавать большую плотность тока по всему образцу. Однако они делают преобразователь слишком громоздким. Также были исследованы модели с использованием магнитной проницаемости сердечника 1500, 2300 и 3000, но значительного влияния на выходной сигнал не обнаружилось. Поэтому в модели был выбран ферритовый сердечник длиной 20 мм и с проницаемостью 2300.

В ряде экспериментальных работ по исследованию импульсного вихретокового контроля было замечено, что временные зависимости выходного сигнала пересекаются в одной точке при изменении зазора между преобразователем и

образцом [2–4, 7, 8]. Это подтвердилось и в модельных расчетах путем увеличения расстояния между преобразователем и образцом от 0,2 до 2,0 мм (рис. 4). Все кривые, за исключением сигнала «без образца», пересекаются в одной точке (LOI-Lift-off intersection point). Наличие этой особой точки позволяет проводить калибровку преобразователя с учетом отстройки от погрешности измеряемых сигналов, вызванных динамическим изменением зазора в процессе контроля.

Наибольший интерес привлекает возможность получения разностного сигнала («возмущения»), вызванного изменением какого-либо электрофизического или геометрического параметра контролируемого образца, в частности, наличие дефекта. На рис. 5 приведены временные зависимости разностного сигнала при изменении количества слоев образца от 1 до 8, в качестве «опорного» использовался сигнал «без образца». Из рисунка очевидно, что есть хорошая возможность построения калибровочных характеристик относительно ряда информативных признаков (амплитуда, «разброс амплитуд», точка пересечения нуля).

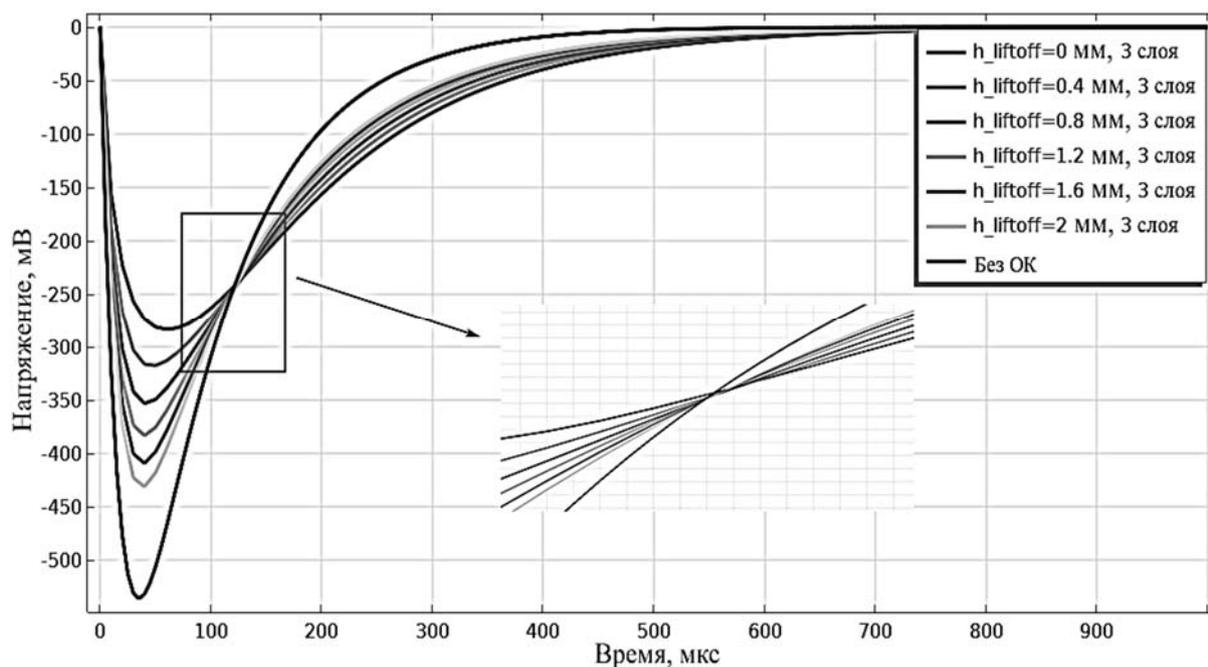


Рис. 4. Временные зависимости выходного сигнала преобразователя при изменении зазора (h_{liftoff})

Для исследования возможности обнаружения и оценки параметров дефектов произвольной формы и расположения создана трехмерная конечно-элементная модель процедуры контроля многослойной конструкции, требующая для своей реализации значительных затрат памяти (не менее 2 ГБ) и времени расчета (до 6 ч). На рис. 6 приведено распределение модуля плотности тока по электропроводящим элементам преобразователя и контролируемого образца. Дальнейшие исследования на 3D-модели должны продемонстрировать потен-

циальные возможности импульсного метода при обнаружении и оценке размеров расслоений, коррозионных дефектов произвольного профиля с помощью спроектированного накладного преобразователя.

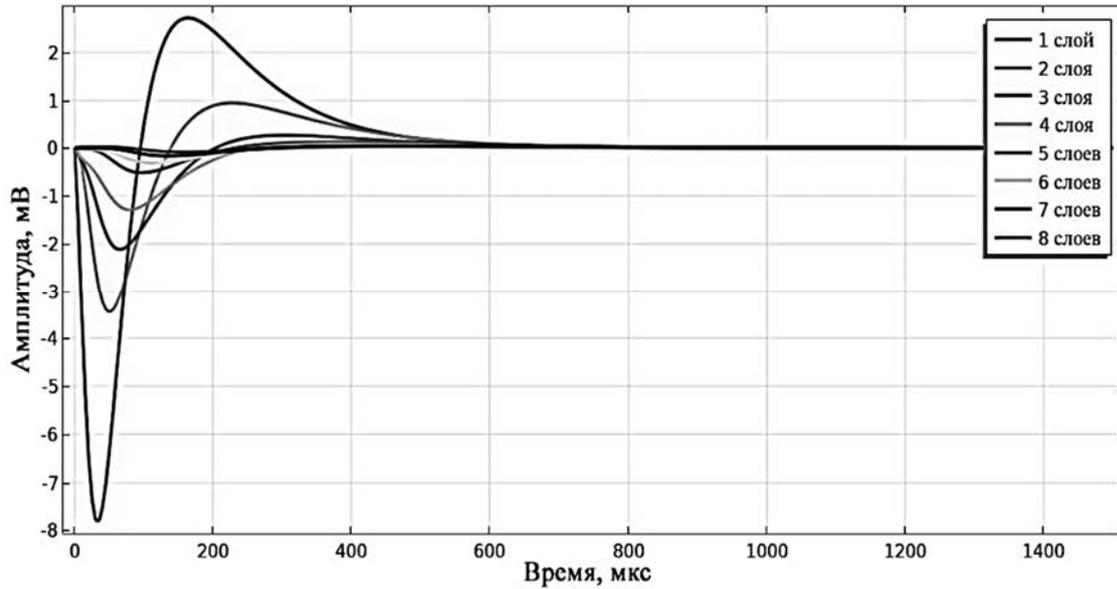


Рис. 5. Временные зависимости разностного сигнала преобразователя при изменении количества слоев образца

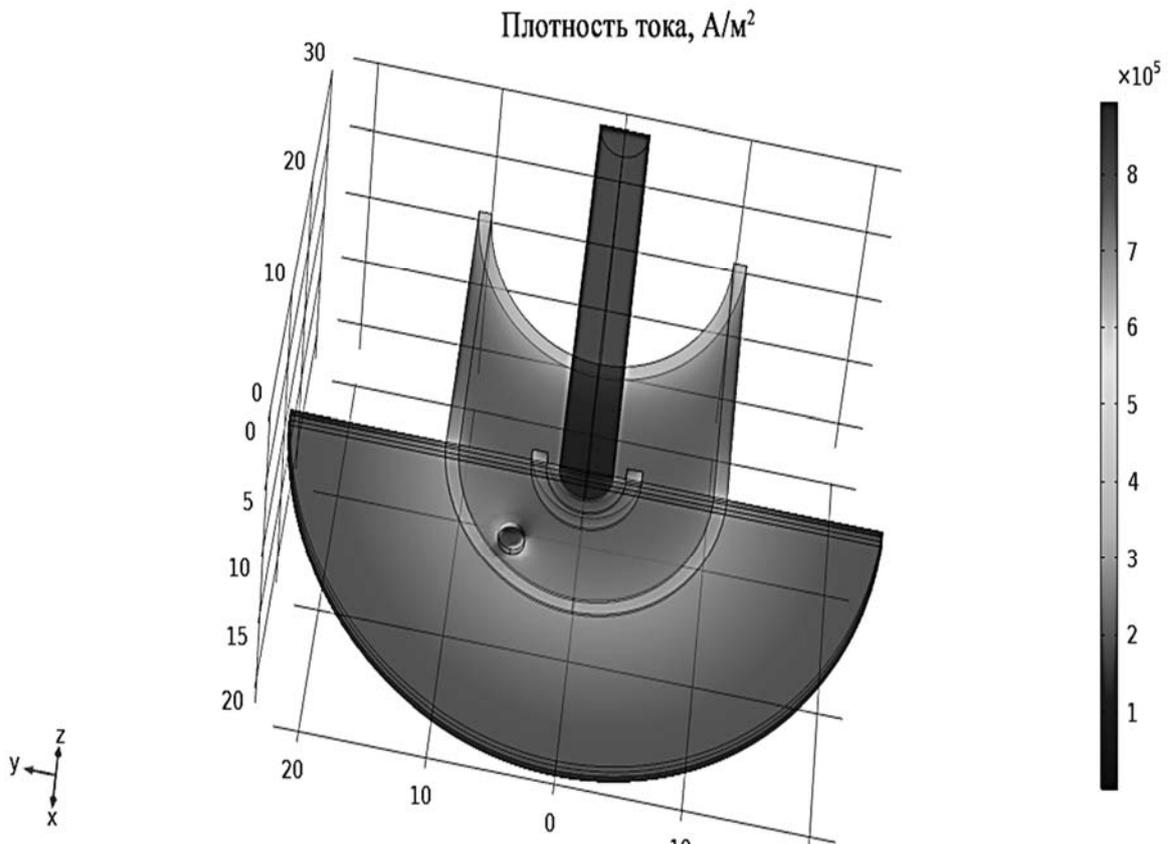


Рис. 6. Трехмерная конечно-элементная модель процедуры контроля многослойной конструкции с дефектом в нижнем слое

Основные выводы. С помощью численной конечно-элементной модели спроектирован импульсный вихретоковый преобразователь для контроля многослойных металлических структур, широко применяемых в авиационной отрасли.

Проведен ряд модельных экспериментов, позволивших провести выбор параметров преобразователя (число витков возбуждающей катушки, магнитная проницаемость и размеры сердечника).

На модели подтверждена гипотеза о наличии общей точки выходного сигнала при изменении зазора между преобразователем и образцом.

Создана трехмерная модель процедуры импульсного контроля с целью оценки возможности обнаружения дефектов в нижних слоях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / Ю. К. Федосенко [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 687 с.

2. **Giguere, S.** Pulsed Eddy Current: Finding Corrosion Independently of Transducer Lift-off / S. Giguere, J. M. S. Dubois // Review of Progress in QNDE, 19, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, Melville, NY, 2000. – Vol. 615. – P. 449–456.

3. **Giguere, S.** Pulsed Eddy Current / S. Giguere, B. A. Lepine, J. M. S. Dubois // Technology: Characterizing Material Loss with Gap and Lift-off Variations. – Review of Progress in QNDE, 20, op. cit., 2001. – P. 119–129.

4. **Plotnikov, Y. A.** Defect Characterization in Multilayered Conductive Components with Pulsed Eddy Current / Y. A. Plotnikov, S. C. Nath, C. W. Rose // Review of Progress in QNDE, 21, op. cit., 2002. – P. 1976–1983.

5. **Krause, T. W.** Diffusion of Pulsed Eddy Currents in Thin Conducting Plates / T. W. Krause, C. Mandache, J. H. V. Lefebvre // Review of Progress in QNDE, 27, op. cit., 2008. – P. 368–375.

6. **Cadeau, T. J.** Pulsed Eddy Current Probe Design Based on Transient Circuit Analysis / T. J. Cadeau, T. W. Krause // Review of Progress in QNDE, 28, op. cit., 2009.

7. Finite Element Modelling of Pulsed Eddy Current Signals from Conducting Cylinders and Plates / V. K. Babbar [et al.] // Review of Progress in QNDE, 28, op. cit., 2009. – P. 311–318.

8. **Babbar, V. K.** Finite Element Modeling of Pulsed Eddy Current Signals from Aluminum Plates Having Defects / V. K. Babbar, D. Harley, T. W. Krause // Review of Progress in QNDE, 29, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, Melville, NY. – 2010. – Vol. 615. – P. 337–344.

E-mail: LuninVP@mpei.ru, KomiaginMA@mpei.ru.

УДК 620.179.17

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

А. Ю. МАРЧЕНКОВ¹, А. П. КРЕНЬ², В. А. БАРАТ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

²Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

UDC 620.179.17

IMPACT OF MICROSTRUCTURE AND RESIDUAL STRESSES ON THE RESULTS OF ACOUSTIC-EMISSION DIAGNOSIS OF RAILWAYS

A. Y. MARCHENKOV, A. P. KREN, V. A. BARAT

Аннотация. Работа посвящена проблеме диагностики железнодорожных рельсов методом акустической эмиссии (АЭ). Выполнены лабораторные испытания по акустико-эмиссионной диагностике фрагментов рельсов, включающие механическое нагружение, близкое к эксплуатационному. Показано, что структурно-механическое состояние металла рельса оказывает влияние на полученные при АЭ-диагностике результаты – для образцов с различными параметрами микроструктуры и остаточных напряжений характерны разные частотные параметры акустических сигналов и характеры распределения параметров АЭ.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, остаточные напряжения, диагностика, дифрактометрия, термическая обработка, рельс, микроструктура.

Abstract. The paper is devoted to the problem of diagnostics of rails by the acoustic emission (AE) method. Laboratory tests on AE diagnostics of rail fragments were performed, including mechanical loading close to operational. It is shown that the structural and mechanical state of the rail metal affects the results obtained during AE diagnostics - specimens with different microstructure and residual stress parameters are characterized by various frequency parameters of acoustic signals and distribution patterns of AE parameters.

Keywords: acoustic emission, residual stresses, diagnostics, diffractometry, heat treatment, rail, microstructure.

Введение. Усталостные изломы рельсов, колесных пар, цельнокатаных железнодорожных колес, боковых рам тележек вагонов и других ответственных частей подвижного состава часто приводят к значительным авариям на железнодорожных путях. Несмотря на использование таких методов неразрушающего контроля (НК), как вихретоковый, ультразвуковой, магнитный и рентгенографический, повышение достоверности выявления дефектов и изменений структурно-механического состояния металла рельсов является актуальной задачей.

Метод акустической эмиссии (АЭ) используется для выявления дефектов и структурных изменений в деталях и конструкциях, применяемых в различных отраслях промышленности. Со временем расширение функционала метода АЭ привело к возможности использования его для оценки кинетики развития

внутренних повреждений [1]. Известны примеры успешного применения акустико-эмиссионного контроля для обнаружения усталостных трещин и других типов опасных дефектов в элементах железнодорожных конструкций. Использование метода АЭ при контроле состояния рельс описано в [2–4]. Исследования показали возможность обнаружения дефектов сплошности в рельсах при эксплуатационных нагрузках.

Вместе с тем, широкое внедрение метода АЭ для диагностики и мониторинга рельсов сдерживается высокой чувствительностью метода к различным конструктивно-технологическим и эксплуатационным факторам. Среди таких факторов можно выделить структурно-механическое состояние металла рельсов, характеризующееся комплексом механических характеристик и параметров микроструктуры. Известно [5], что метод АЭ чувствителен к микроструктурным изменениям, происходящим под воздействием термомеханической обработки деталей и конструкций при их изготовлении, а также под воздействием эксплуатационных факторов. В [6] показано, что при различных видах термической обработки получаются разные результаты акустико-эмиссионного контроля однотипных изделий. Также известно о влиянии неметаллических включений на результаты АЭ-контроля [7], поскольку морфология включений и их ориентация оказывает влияние на механические свойства и характер разрушения сталей. Остаточные напряжения, возникающие в материале в процессе изготовления, также сказываются на результатах АЭ-диагностики [8].

Таким образом, с учётом высокой чувствительности метода АЭ к описанным выше факторам, даже для бездефектных материалов достаточно трудно выявить универсальные диагностические критерии для обнаружения дефектов. Такие критерии могут быть разработаны для однотипных конструкций, изготавливаемых из ограниченного перечня материалов. В этом случае за счет одинаковой геометрии и учёта специфических особенностей отклика АЭ на параметры структурно-механического состояния конкретного материала диагностические критерии могут быть определены достаточно точно. В этом плане железнодорожные рельсы являются удачным объектом для исследования. Однако для того чтобы качественно применить АЭ-мониторинг на рельсах, необходимо провести предварительные исследования по выявлению технологических факторов, влияющих на результаты контроля.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния структурно-механического состояния металла железнодорожных рельсов на параметры акустико-эмиссионной диагностики. Исследовано влияние микроструктуры и остаточных напряжений на параметры акустических сигналов, регистрируемых в процессе нагружения рельсов нагрузкой, близкой к эксплуатационной. Результаты исследования являются первым необходимым шагом к формированию диагностических критериев, позволяющих производить дефектоскопию рельсов в процессе их эксплуатации.

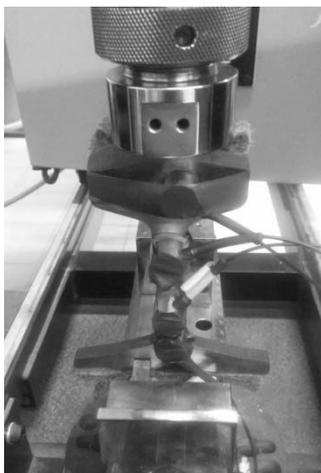
Материалы и методы исследования. Все эксперименты проводили на фрагментах рельсов толщиной 10 мм (рис. 1, а). Всего исследовали 12 фрагментов, которые разделили на три партии. Партия 1 – рельсы в исходном состоянии; партия 2 – рельсы после дополнительной термической обработки

(ТО) по режиму «отпуск 450 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе»; партия 3 – рельсы после дополнительной термической обработки (ТО) по режиму «отжиг 850 °С, выдержка 2 ч, охлаждение с печью + закалка 820 °С, выдержка 1 ч, охлаждение в масле + отпуск 450 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе».

а)



б)



в)

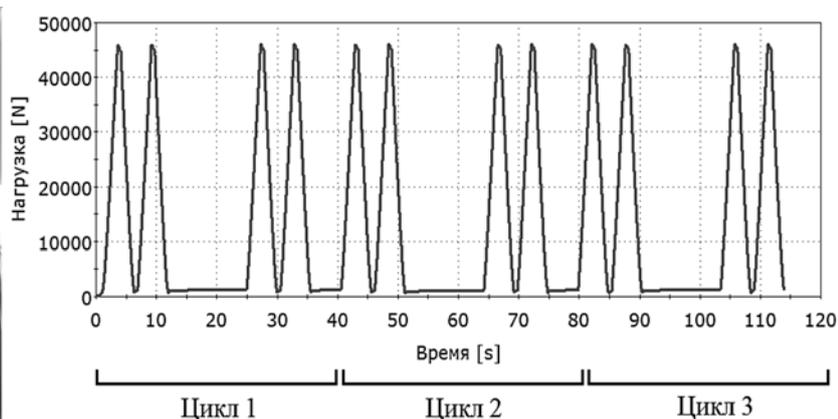


Рис. 1. Фрагменты рельсов для исследований (а), нагружение фрагмента сжатием на испытательной машине (б) и циклограмма нагружения (в)

После ТО один из фрагментов из каждой партии разрезали для металлографического анализа, который проводили на микрошлифах методом оптической микроскопии.

Анализ распределения остаточных напряжений проводили на поверхности одного из фрагментов рельсов из каждой партии методом рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр GNR STRESS X). На каждом фрагменте измерения проводили в 13–15 различных точках сечения.

Далее на подготовленных фрагментах рельсов проводили исследования по их АЭ-диагностике с нагружением, близким к эксплуатационному. Для этого фрагмент рельса с закреплёнными на его торцевых поверхностях преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) устанавливали на испытательную машину Instron 5982 (рис. 1, б) и производили циклическое нагружение сжатием (рис. 1, в). Регистрация акустических сигналов в процессе испытаний осуществ-

лялась при помощи промышленной системы A-Line 32D. Измерительный тракт состоял из резонансных преобразователей и предварительных усилителей электрического сигнала ПАЭФ-014. Уровень акустического шума после установки образца в испытательную машину составил 34 дБ. В соответствии с рекомендациями ПБ 03-593-03 порог дискриминации акустических сигналов был установлен равным 40 дБ.

Результаты исследований. Результаты металлографических исследований показаны на рис. 2. Структура всех образцов рельсов – феррито-перлитная механическая смесь с разной степенью дисперсности. В исходном состоянии и после отпуска структура перлитная крупнозернистая с ферритом, выделившимся по границам исходным аустенитных зёрен (см. рис. 2, *а*, *б*). В образце, подвергнутом обработке по режиму «отжиг + закалка + отпуск», за счёт двойной фазовой перекристаллизации размер зёрен перлита существенно снизился (см. рис. 2, *в*).

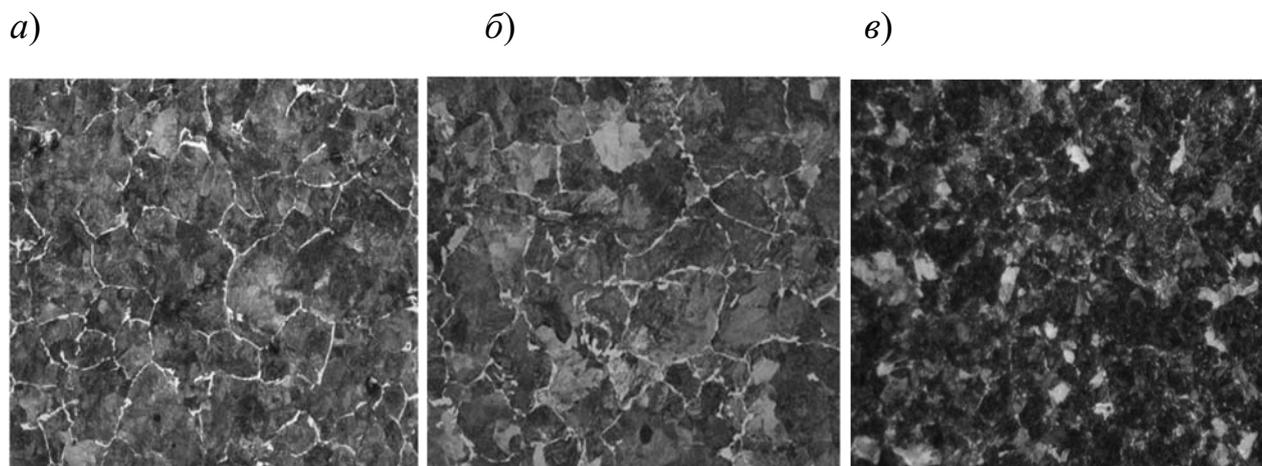


Рис. 2. Микроструктура фрагментов рельсов в исходном состоянии (*а*) и после ТО по режиму «отпуск» (*б*) и «отжиг + закалка + отпуск» (*в*) (все – 200х)

Фрагменты рельсов в исходном состоянии характеризуются высокими остаточными напряжениями (рис. 3, *а*). После отпуска средний уровень напряжений оказался несколько снижен (рис. 3, *б*), после обработки по режиму «отжиг + закалка + отпуск» уровень внутренних напряжений стал минимальным относительно всех фрагментов (рис. 3, *в*).

Результаты АЭ-диагностики представлены в виде распределений активности АЭ и амплитуд АЭ-сигналов на рис. 4.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что результаты акустико-эмиссионной диагностики фрагментов рельсов при их циклическом нагружении сжатием, близком к эксплуатационному, зависят от структурно-механического состояния металла рельсов. Различие параметров микроструктуры и уровня остаточных напряжений приводит к изменению распределений активности и амплитуд, а также спектральных параметров зарегистрированных АЭ-сигналов.

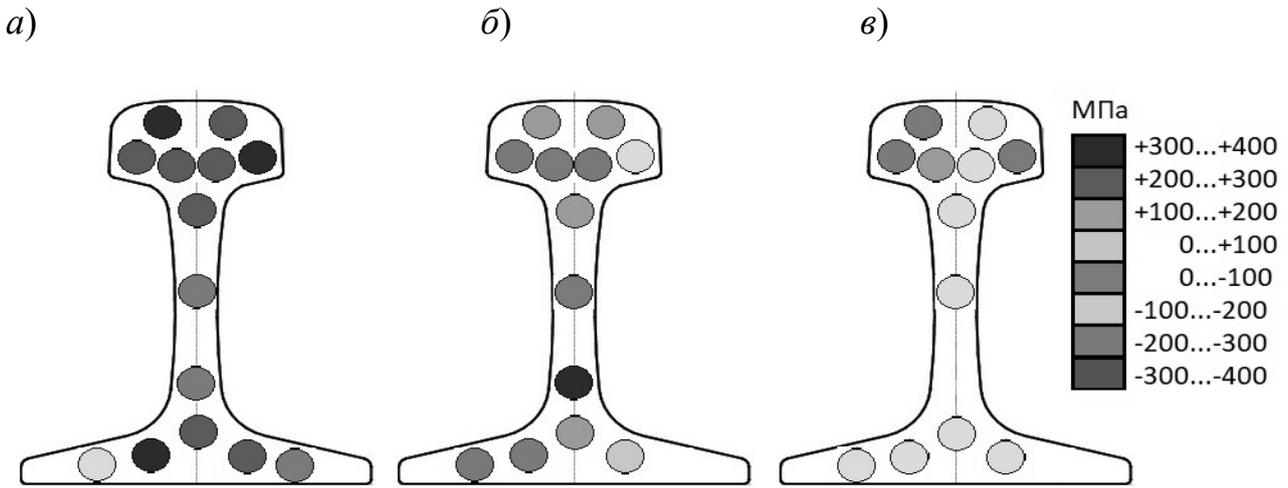


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в фрагментах рельсов

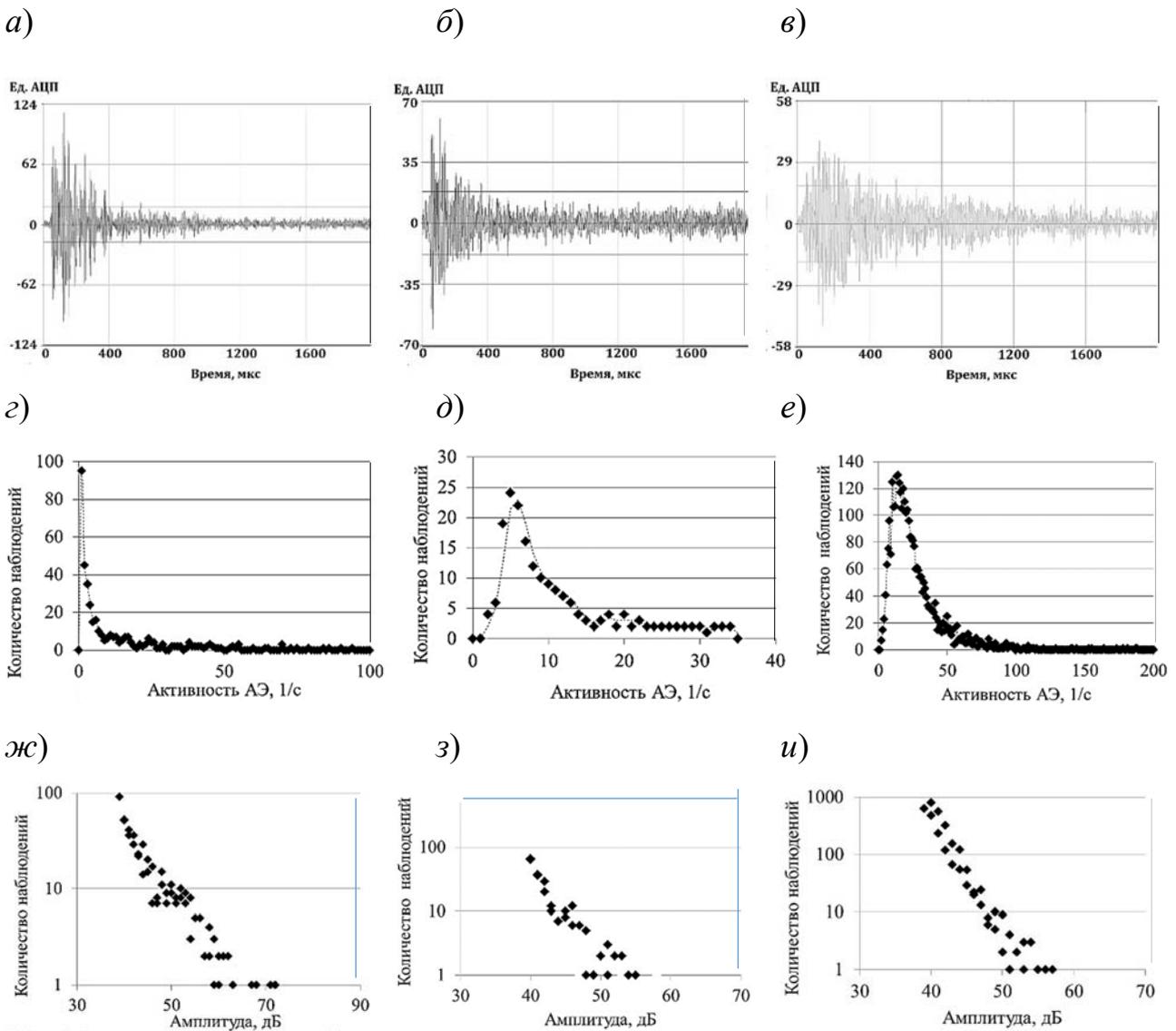


Рис. 4. Осциллограммы АЭ-сигналов (а–в), распределения активности АЭ (г–е) и амплитуд АЭ-сигналов (ж–и) для трёх рельсов: а, г, ж – в исходном состоянии; б, д, з – после ТО по режиму «отпуск»; в, е, и – после ТО по режиму «отжиг + закалка + отпуск»

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Научно-технического университета «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» (проект 20-38-51019).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ono, K.** Review on Structural Health Evaluation with Acoustic Emission / K. Ono // Applied Science. – 2018. – Vol. 8, № 958.
2. **Bruzelius, K.** An initial investigation on the potential applicability of Acoustic Emission to rail track fault detection / K. Bruzelius, D. Mba // NDT&E International. – 2004. – Vol. 37. – P. 507–516.
3. **Bassim, M. N.** Detection of the onset of fatigue crack growth in rail steel using acoustic emission / M. N. Bassim, S. St. Lawrence, C. D. Liu // Engineering Fracture Mechanics. – 1994. – Vol. 41, № 2. – P. 207–214.
4. **Suwansin, W.** Deep Learning-Based Acoustic Emission Scheme for Nondestructive Localization of Cracks in Train Rails under a Load / W. Suwansin, P. Phasukkit // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 272.
5. The use of acoustic emission techniques to monitor fracture processes in high strength precipitation hardened aluminum alloys / A. Arieli [et al.] // Mechanics of Materials. – 1983. – Vol. 2, № 1. – P. 1–7.
6. **Houssny-Emam, M.** Study of the effect of heat treatment on low cycle fatigue in AISI4340 steel by acoustic emission / M. Houssny-Emam, M. N. Bassim // Materials Science and Engineering. – 1983. – Vol. 61, № 1. – P. 79–88.
7. **Scruby, C. B.** Effect of inclusion orientation upon acoustic emission-microstructural relationships in ferritic steels / C. B. Scruby, H. N. G. Wadley // Journal of materials science. – 1994. – Vol. 29, № 16. – P. 4167–4176.
8. Residual stress evaluation in friction stir welding of aluminum plates by means of acoustic emission and ultrasonic waves / S. Sadeghi [et al.] // FME Transactions. – 2018. – Vol. 46, № 2. – P. 230–237.

E-mail: art-marchenkov@yandex.ru.

УДК 620.179.147

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ ПРОТЕКТОРА ДЛЯ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ*А. Г. ОТОКА¹, О. В. ХОЛОДИЛОВ²*¹РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги»²Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь

UDC 620.179.147

USE OF VARIOUS MATERIALS AS A PROTECTOR FOR EDGE-CURRENT TRANSDUCERS*A. G. OTOKA, O. V. KHOLODILOV*

Аннотация. Рассмотрены проблемы, связанные с частым разрушением защитных протекторов вихретокового преобразователя типа МДФ. Предложено решение проблемы путем изготовления протекторов из различных материалов собственными силами предприятий, выполняющих неразрушающий контроль деталей вихретоковым методом с применением аналогичных преобразователей в защитном корпусе. Проведен сравнительный анализ различных легкодоступных материалов, которые можно использовать в качестве протектора вихретоковых преобразователей на примере преобразователя ПН-12-МДФ01.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, преобразователь вихретоковый, протектор, стандартный образец, керамика, капролон, фторопласт, древесина, текстолит, коэффициент усиления, чувствительность.

Abstract. The problems associated with the frequent destruction of protective protectors of an eddy current converter of the MDF type are considered. A solution to the problem is proposed by manufacturing protectors from various materials by own efforts of enterprises performing non-destructive testing of parts by the eddy current method using similar converters in a protective housing. A comparative analysis of various readily available materials that can be used as a protector of eddy current converters is carried out on the example of the PN-12-MDF01 converter.

Keywords: eddy current testing, eddy current transducer, standard sample, protector, ceramics, caprolon, fluoroplast, wood, textolite, amplification factor, sensitivity.

Введение. Вихретоковый метод (далее – ВТ) начал применяться на железнодорожном транспорте относительно недавно. По сравнению с ультразвуковым и магнитопорошковым методами контроля, для которых давно и четко отработаны требования к методикам и дефектоскопам в отраслевых, государственных и межгосударственных стандартах, к ВТ-дефектоскопам таких требований нет [1].

Технические характеристики вихретоковых дефектоскопов в значительной мере определяются конструкцией вихретоковых преобразователей [2].

Преобразователи вихретоковые (далее – ВТП) типа МДФ (ПН-12-МДФ01, ПН-09-МДФ-У-01) предназначены для работы с дефектоскопами вихретоковыми ВДЗ-71 (рис. 1), ВД-132-ОКО-01 и аналогичными, а также в составе

установок и систем неразрушающего контроля (далее – НК) при проведении вихретокового контроля (далее – ВТК) и выявления дефектов типа несплошностей, выходящих на поверхность или залегающих на небольшой глубине, разнообразных трещин, расслоений и других дефектов в электропроводящих металлах и сплавах.

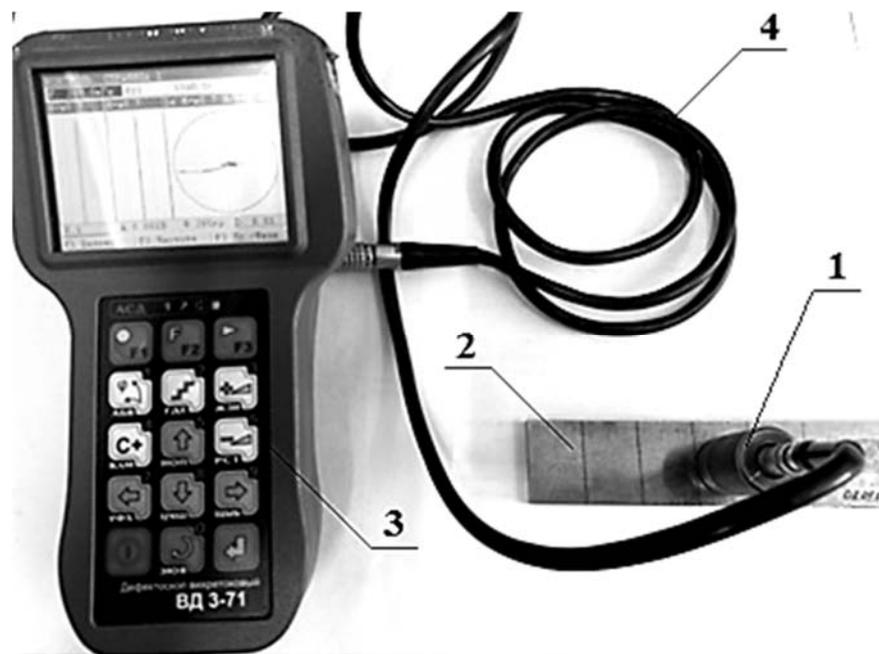


Рис. 1. Внешний вид дефектоскопа вихретокового ВДЗ-71 в комплекте с ВТП и стандартным образцом предприятия СОП 2353.08: 1 – преобразователь типа МДФ в защитном корпусе; 2 – стандартный образец предприятия СОП 2353.08 с искусственными дефектами; 3 – блок электронный дефектоскопа; 4 – кабель соединительный для подключения ВТП к электронному блоку

ВТП относится к неремонтируемым изделиям. При эксплуатации ВТП следует предохранять от ударов и механических повреждений [3]. В целях исключения износа ВТП типа МДФ последний устанавливают в защитный корпус со сменным протектором (рис. 2).

При установке ВТП типа МДФ в защитный корпус метка на корпусе преобразователя должна совпадать с линией на торце защитного корпуса.

При проведении контроля ВТП типа МДФ метка на корпусе ВТП должна обязательно совпадать с направлением траектории сканирования (рис. 3).

В основе ВТК лежит закон электромагнитной индукции Фарадея и анализ взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем. Плотность вихревых токов уменьшается по глубине в материале [4].

Распределение плотности вихревого тока можно представить на примере дюралевой пластины с удельной электрической проводимостью материала 30 МСм/м, толщиной 4 мм и площадью $20 \times 40 \text{ мм}^2$ с поперечным поверхностным дефектом по центру в виде прорези глубиной 3 мм и шириной 0,4 мм.

На рис. 4, а цветовым градиентом показано распределение плотности вихревого тока, полученное в среде ComsolMultiphysics, индуцированного обмоткой возбуждения для случая расположения ВТП над бездефектным участком.

На рис. 4, б цветовым градиентом показано распределение плотности вихревого тока, индуцированного обмоткой возбуждения для случая расположения ВТП симметрично относительно прорези.

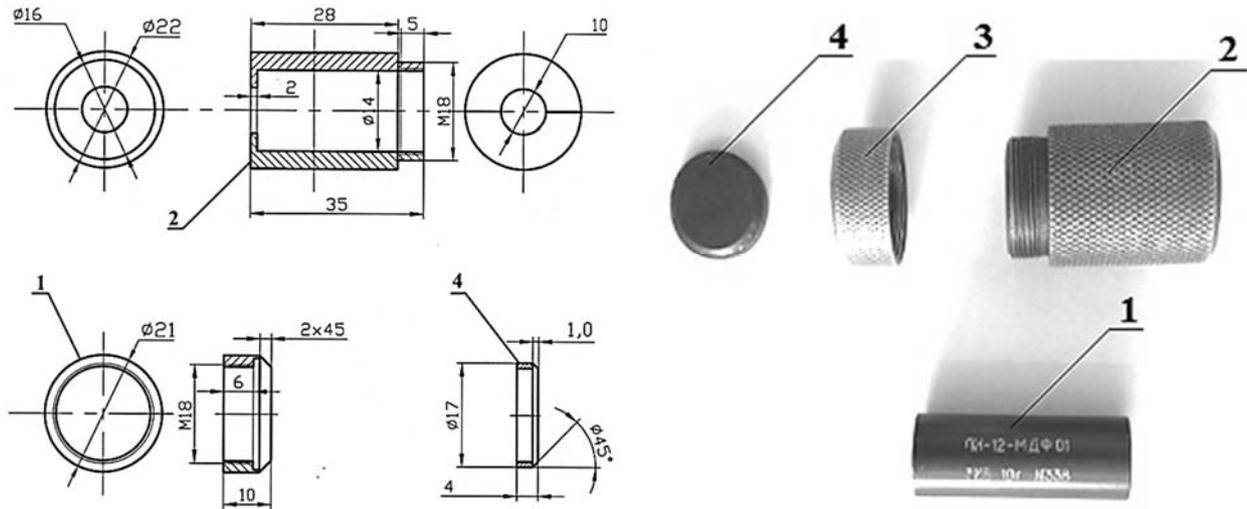


Рис. 2. Размещение ВТП типа МДФ в защитном корпусе: 1 – ВТП ПН-12-МДФ01; 2 – основание корпуса; 3 – крышка корпуса; 4 – протектор

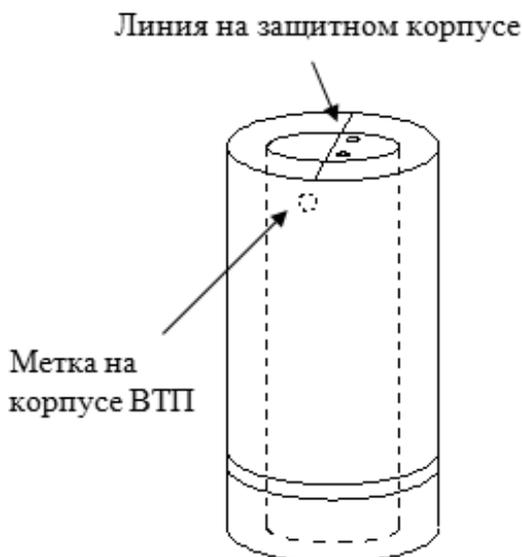


Рис. 3. Расположение ВТП ПН-12-МДФ01 в защитном корпусе

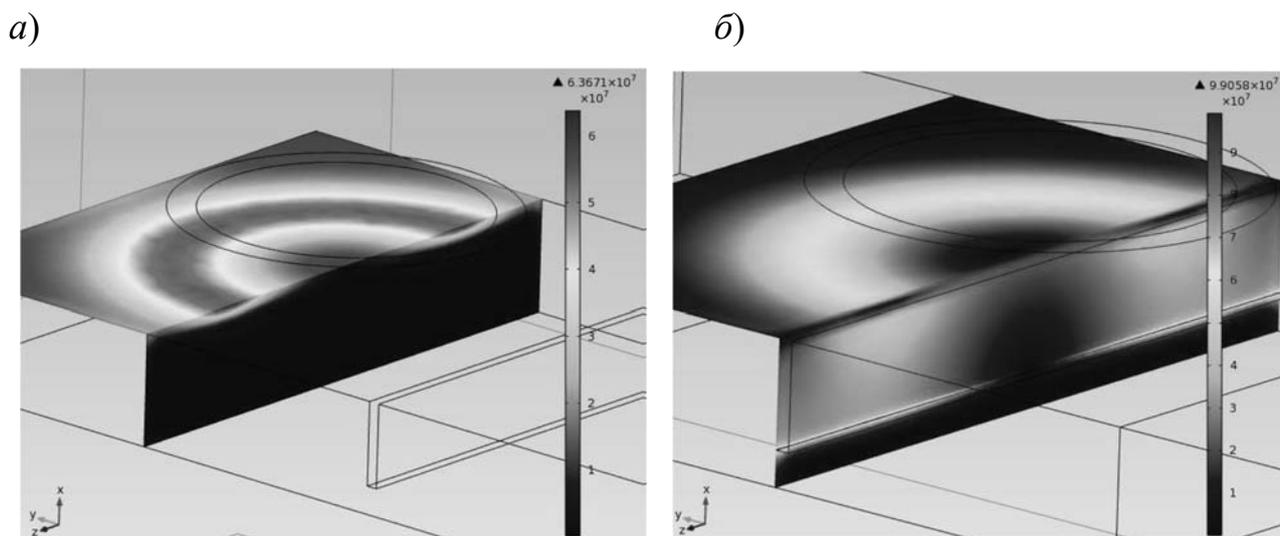


Рис. 4. Распределение плотности вихревого тока на бездефектном участке (а) и на участке с дефектом (б) [2]

Чувствительность ВТК, как и любого другого вида НК, характеризуется минимальным размером выявляемого дефекта. Выходящая на поверхность трещина может быть охарактеризована глубиной, протяженностью, шириной раскрытия, углом направления распространения трещины от поверхности и т. п. [7].

Однако заводские керамические протекторы часто разрушаются в результате соударения с какой-либо поверхностью. Вследствие этого возникает необходимость приобретения новых, стоимость которых в настоящее время составляет $\approx 40 \dots 80$ у. е. Приходится обращаться к изготовителю ВТП, что приводит к большим временным потерям на получение положительного результата.

Результаты эксперимента и их обсуждение. ПН-12-МДФ01 представляет собой трансформаторный, дифференциальный ВТП накладного типа с размером рабочей поверхности $\varnothing 12$ мм. Схема подключения ВТП представлена на рис. 5. Габаритные размеры – $\varnothing 13 \times 38$ мм. Диапазон рабочих частот ВТП составляет $100 \dots 250$ кГц.

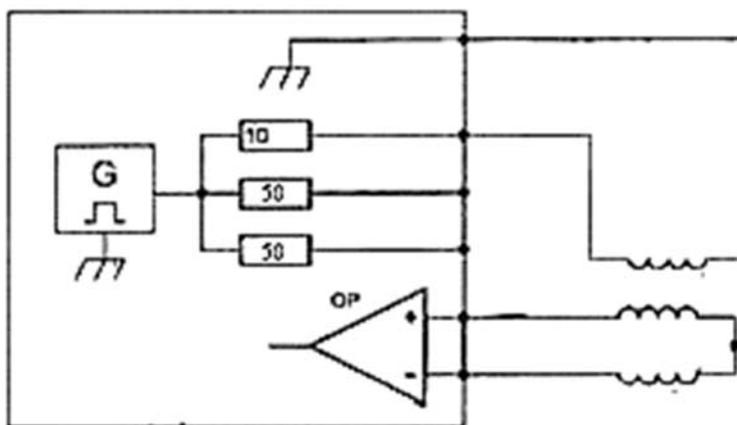


Рис. 5. Схема подключения ВТП ПН-12-МДФ01

Проведенные нами исследования показали, что в качестве протектора можно использовать некоторые материалы, отвечающие ряду требований.

В соответствии с размерами заводского керамического протектора ВТП ПН-12-МДФ01 нами были изготовлены протекторы из фторопласта, текстолита, капролона и древесины. Выбор таких материалов связан с широким применением их в различных сферах на производстве. Основным критерием выбора материала является износостойкость и ударопрочность. Также следует отметить, что материал должен быть немагнитным и обладать низким коэффициентом трения.

Основным параметром с точки зрения безопасности является глубина трещины, а затем её длина. Ширина раскрытия трещины влияет на возможность её выявления. Наиболее опасными являются трещины большой глубины при малом раскрытии [1].

Для сравнительного анализа всех материалов по выявлению дефектов за основу использовалась амплитуда сигнала от искусственных дефектов (ИД) типа «пропил» глубиной 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 мм на поверхности стандартного образца СОП 2353.08. Измерения проводились по рабочей поверхности Б СОП 2353.08 с шероховатостью $Ra = 1,25$ мкм.

Протекторы из различных материалов изготавливались толщиной 1,0 мм по аналогии с заводским керамическим. Толщина протектора контролировалась с использованием микрометра типа МК с ценой деления 0,01 мм (рис. 6).



Рис. 6. Измерение толщины керамического протектора микрометром типа МК

Стандартный образец предприятия СОП 2353.08 (рис. 7) относится к средствам проверки общей работоспособности вихретоковых дефектоскопов и рассчитан на применение совместно с вихретоковыми дефектоскопами ВДЗ-71, ВД-132 и др. [5].

Основные параметры настройки дефектоскопа ВДЗ-71 при использовании ВТП ПН-12-МДФ01 приведены в табл. 1.

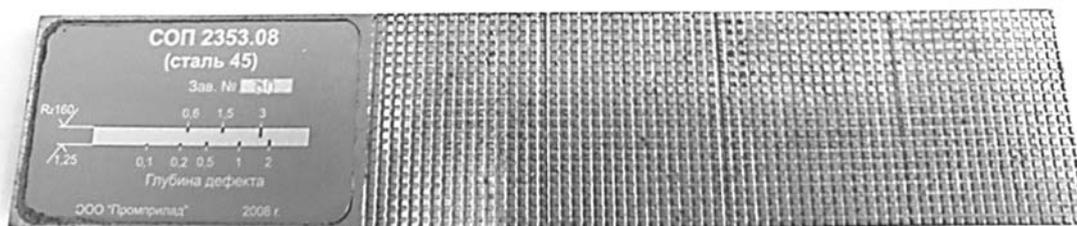


Рис. 7. Стандартный образец СОП 2353.08 (сталь 45)

Табл.1. Параметры настройки дефектоскопа ВДЗ-71

Рабочая частота ВТП F , кГц	Коэффициент усиления K_{y1} , дБ	Напряжение возбуждения ВТП U_z , В	Изменение фазы сигнала φ , град	Тип рамки АСД	Количество рамок	Радиус рамки (круга), % экрана	Масштаб (X, Y)
200	0...40	2,0	138	Круг	1	100	x0,7
<p><i>Примечание</i> – В окне пункта меню «Вид» задаётся тип отображения «XY» – комплексная плоскость</p>							

Сравнительный анализ материалов, используемых в качестве протектора ВТП, заключался в следующем.

1. ВТП в защитном корпусе с протектором из определенного материала (перечень возможных материалов протектора приведен выше) устанавливался на образец СОП 2353.08 в бездефектном месте.

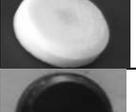
2. ВТП перемещался через искусственные дефекты ИД5...ИД8 последовательно, начиная с наименьшего по глубине залегания. При перемещении ВТП через искусственный дефект со скоростью в интервале 10...100 мм/с [6] убеждались, что происходит чёткое отклонение сигнала от центра экрана. С помощью регулировки усиления K_{y1} добивались, чтобы индикация от искусственного дефекта глубиной 0,2; 0,5; 1,0 и 2,0 мм была равна или незначительно превышала пороговый уровень. При этом должна была срабатывать автоматическая сигнализация дефектов (АСД).

3. Фиксировались значения коэффициента усиления K_{y1} дефектоскопа каждого материала протектора по отдельности по ИД5...ИД8 по стандартному образцу СОП 2353.08.

Значение коэффициента усиления дефектоскопа ВДЗ-71 с использованием в качестве протектора ВТП ПН-12МДФ-01 различных немагнитных материалов приведены в табл. 2.

Диаграмма зависимости коэффициента усиления дефектоскопа ВДЗ-71 с использованием ВТП ПН-12-МДФ01 с протекторами, изготовленными из материалов различной природы от глубины искусственного дефекта стандартного образца СОП 2353.08, приведена на рис. 8.

Табл. 2. Порог чувствительности дефектоскопа с использованием различных материалов протектора

Материал протектора ВТП		Коэффициент усиления дефектоскопа K_{y1} , дБ			
		ИД5	ИД6	ИД7	ИД8
	Фторопласт (диэлектрик, низкая износостойкость, высокая теплостойкость, меньшая прочность по сравнению с термопластичными полимерами)	24	17	12	10
	Текстолит (диэлектрик, высокая прочность при сжатии, высокая ударопрочность)	25	18	14	12
	Древесина (диэлектрик, низкая теплопроводность, износостойкость зависит от условий эксплуатации)	26	20	16	13
	Капролон (диэлектрик, высокая прочность)	23	16	12	10
	Керамика (диэлектрик, высокая хрупкость, теплопроводность, твердость)	24	18	13	11

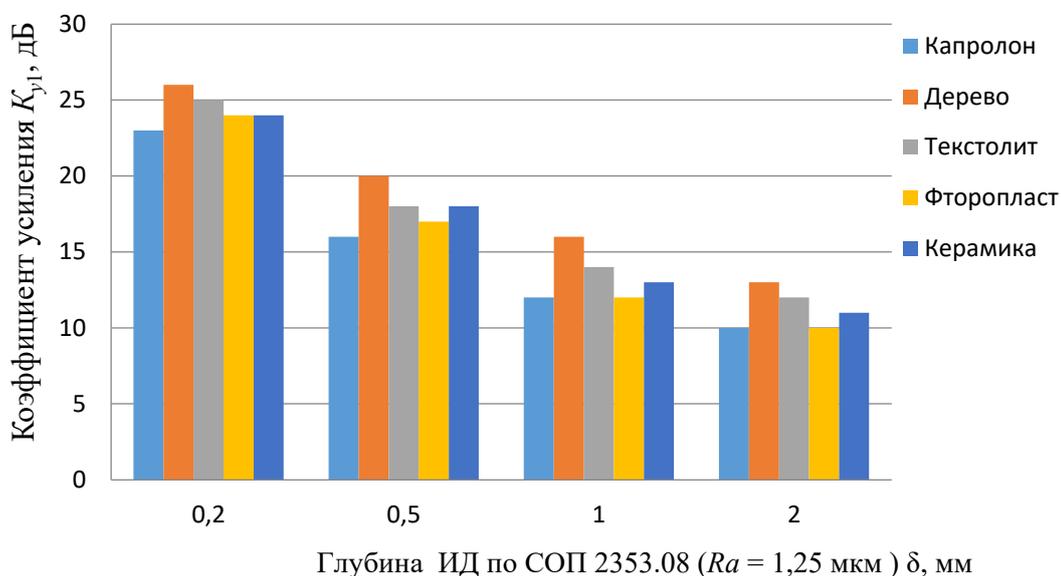


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления дефектоскопа от материала протектора ВТП

Установлено, что порог чувствительности дефектоскопа с использованием протектора из капролона и фторопласта незначительно ниже (т. е. выявляются дефекты при меньшем значении коэффициента усиления K_{y1}), чем у керамического (рис. 9).



Рис. 9. Установление порога чувствительности дефектоскопа с использованием ВТП с протектором из капролона (усиление дефектоскопа 23 дБ): 1 – усиление дефектоскопа; 2 – ВТП в защитном корпусе с протектором из капролона; 3 – сигнал от ИД5 (глубина 0,2 мм); 4 – пороговый уровень; 5 – индикация автоматической сигнализации дефектов (АСД)

Порог чувствительности дефектоскопа с использованием протектора из текстолита незначительно выше (т. е. выявляются дефекты при большем значении коэффициента усиления K_{y1}), чем при использовании керамического.

При этом использование протектора из древесины показало, что выявляемость дефектов типа «пропил» ИД5...ИД8 по СОП 2353.08 наименее уверенная (т. е. коэффициент усиления K_{y1} имеет однозначно выше значения) в сравнении с заводским керамическим и другими протекторами, которые изготовлены из капролона, фторопласта, текстолита (рис. 10).

Заключение. Из проведенных исследований следует, что в качестве протектора ВТП типа МДФ с точки зрения чувствительности можно использовать все рассмотренные материалы. Лучшей износостойкостью обладают текстолит и капролон. Фторопласт обладает низкой износостойкостью, и при использовании его в качестве материала протектора это приведет к необходимости частой замены протектора. Применение протектора из древесины нецелесообразно в связи с более низкой чувствительностью контроля и высокой зависимостью износостойкости материала от условий эксплуатации.

Применение протекторов из текстолита и капролона позволяет отказаться от приобретения дорогостоящих и хрупких фирменных керамических протекторов и в то же время сохранить требуемую чувствительность контроля, что является основным фактором при замене.

Изготовление протекторов силами самих предприятий позволит сократить затраты на приобретение протекторов в ≈ 50 –100 раз.



Рис. 10. Установление порога чувствительности дефектоскопа с использованием ВТП с протектором из древесины (усиление дефектоскопа 26 дБ): 1 – усиление дефектоскопа; 2 – ВТП в защитном корпусе с протектором из древесины; 3 – сигнал от ИД5 (глубина 0,2 мм); 4 – пороговый уровень; 5 – индикация автоматической сигнализации дефектов (АСД)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вихретоковый контроль в системе неразрушающего контроля деталей подвижного состава ОАО «РЖД» / А. В. Чуприн [и др.] // В мире НК. – 2019. – № 2. – С. 66–72.
2. **Белянков, В. Ю.** Анализ различных конструктивных вариантов накладного вихретокового преобразователя дефектоскопа / В. Ю. Белянков // Вестн. науки Сибири. – 2014. – № 3 (13). – С. 27–40.
3. **Этикетка ПН-12-МДФ01-33.2-23535778-2007Э.** Преобразователь вихретоковый ПН-12-МДФ01. – Москва: Промприлад, 2007. – 3 с.
4. **ГОСТ Р ИСО 15549-2009.** Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 8 с.
5. **Паспорт СОП 2353.08-09 ПС.** Стандартные образцы СОП 2353.08 и СОП 2353.09. – Москва: Промприлад, 2006. – 5 с.
6. **ВД 3-71.23535778.005.00.00-01 РЭ.** Руководство по эксплуатации. Дефектоскоп вихретоковый портативный ВД3-71 НКIVУ. – Москва: Промприлад, 2009. – 54 с.
7. О чувствительности вихретокового контроля деталей железнодорожного подвижного состава / Г. Я. Дымкин [и др.] // Дефектоскопия. – 2019. – № 8. – С. 47–53.

УДК 620.130

КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ***В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ***Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 620.130

CONTROL OF OBJECTS OF COMPLEX SHAPE IN A MAGNETIC FIELD***V. V. PAVLYUCHENKO, E. S. DOROSHEVICH***

Аннотация. С помощью разработанных методов гистерезисной интерференции проведены теоретические расчеты распределений электрического напряжения $U(x)$, снимаемого с магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с арктангенсной характеристикой с записями полей линейного индуктора, от пространственной координаты x . Получены зависимости $U(x)$ для пластин из магнитного носителя, установленных друг к другу под углами $7\pi/8$, $\pi/2$ и π рад, на основании которых сформированы их оптические изображения. Полученные результаты позволяют повысить точность контроля геометрических размеров объектов, их толщины и ориентации в пространстве, а также дефектов сплошности в них.

Ключевые слова: гистерезисная интерференция, импульсное магнитное поле, магнитный носитель.

Abstract. Using the developed methods of hysteresis interference, theoretical calculations of the distributions of the electric voltage $U(x)$ taken from a magnetic head scanning a magnetic carrier with an arctangent characteristic with recordings of the fields of a linear inductor from the spatial coordinate x were performed. The dependences $U(x)$ are obtained for plates from a magnetic carrier mounted to each other at angles $7\pi/8$, $\pi/2$ and π radians, on the basis of which their optical images are formed. The obtained results allow to increase the accuracy of control of geometric dimensions of objects, their thickness and orientation in space, as well as continuity defects in them.

Keywords: hysteresis interference, pulsed magnetic field, magnetic carrier.

Использование гистерезисной интерференции HI на магнитном носителе (МН) [1] для контроля свойств объектов значительно повышает чувствительность и точность контроля. Этому способствуют также расчеты распределений остаточных магнитных полей магнитного носителя и методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи электропроводящих объектов [2, 3]. В отличие от вихретокового вида [4–7] использование магнитного носителя позволяет производить записи мгновенных распределений магнитных полей на больших площадях. Вместе с тем, возможности магнитографического метода контроля [8, 9] могут быть выведены на новые уровни с проведением анализа способов записи и анализа информации, записанной на МН [10]. Кроме того, магнитный носитель и HI могут быть применены для контроля свойств объектов в их труднодоступных участках [11], где другие датчики и устройства не могут быть использованы.

Целью работы является повышение точности контроля геометрических параметров объектов сложной формы и их свойств. Для этого проведены

исследования распределений сигнала, снимаемого с магнитной головки (МГ), сканирующей пластины магнитного носителя, расположенного под разными углами друг к другу, как в отсутствии объекта, так и вместе с ним.

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

$$U_1 = B + 24,3 \operatorname{arctg}(0,011H_1 - C), \quad (1)$$

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

$$U_2 = -B + 0,61U_1 + (24,5 + 0,40U_1)\operatorname{arctg}((0,011 + DU_1)H_2 + C - 16U_1), \quad (2)$$

где B, C, D – постоянные.

Величину электрического напряжения при воздействии на МН третьим импульсом магнитного поля в прямом направлении U_3 находили по (2) с коррекцией знаков.

Как было показано ранее [11], гистерезисная интерференция позволяет определять параметры объектов в труднодоступных участках, например, в узких щелях, где другие методы, например, вихретоковые, магнитодинамические и другие [4, 12] применить нельзя. В данной работе рассмотрены возможности определения взаимной ориентации объектов, изготовленных из диамагнитных, парамагнитных или ферромагнитных материалов, которые могут являться проводниками, полупроводниками или изоляторами. Схема использования оптических изображений магнитных полей для определения углов между двумя пластинами из магнитного носителя показана на рис. 1, где представлены картины HI на этих пластинах с максимумами интерференций 1–5. Объект отсутствует. Здесь же обозначен линейный индуктор 6, создающий импульсное магнитное поле между этими пластинами, образующими между собой угол $\pi/2$. Ось линейного индуктора параллельна плоскостям пластин и находится на биссектрисе образуемого ими угла. На рис. 2 показаны зависимости $U(x)$, рассчитанные по (1) и (2) для пластин МН, установленных друг к другу под углами π и $\pi/2$ рад, а на рис. 3 и 4 представлены оптические изображения этих зависимостей, сформированные путем построения зеркальных функций. По размахам сигнала и распределениям максимумов 1–3 можно определить угол между пластинами МН. Величина нулевого максимума HI 1 на рис. 3 равна 16 мВ, на рис. 4 – 84 мВ. При этом оптические изображения на рис. 3 не следует деформировать, а изображения на рис. 4 надо расположить с учетом угла между пластинами МН, как это сделано на рис. 6.

Такие же действия проведены с оптическими изображениями магнитных полей пластин МН, установленных друг к другу под углом $7\pi/8$ рад (рис. 5).

Если к пластинам МН вплотную приложены пластины из алюминия, то получаем зависимости $U(x)$ 1–4 с максимумами 5–8, изображенные

на рис. 7 и 8. Отметим, что на рис. 7 в области $-2,5 \text{ см} \leq x \leq 0 \text{ см}$ кривые 1 и 2 описывают гистерезисную интерференцию на продолжении правой пластины МН на рис. 6 в область отрицательных значений аргумента и в отсутствие левой пластины. Для того чтобы получить изображение на левой пластине (см. рис. 6), следует построить графики зеркальных функций 5 и 6, что и сделано на рис. 8.

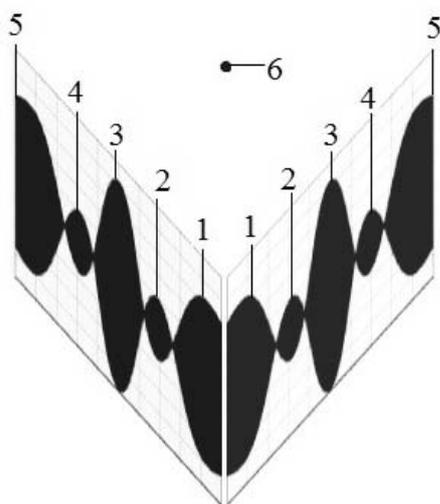


Рис. 1. Оптические изображения магнитных полей двух пластин МН

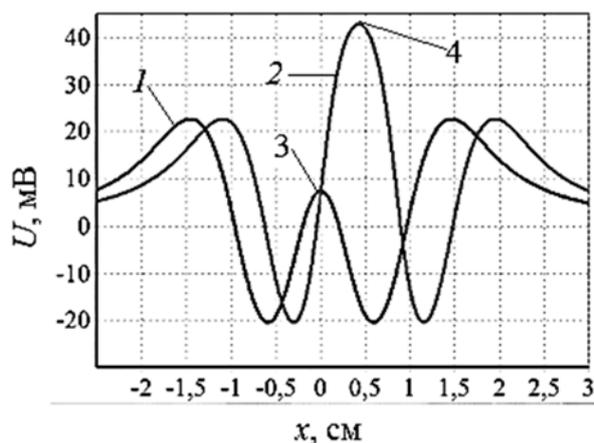


Рис. 2 Зависимости $U(x)$: для пластин МН, установленных друг к другу под углом: 1 – π рад; 2 – $\pi/2$ рад; 3, 4 – максимумы сигнала

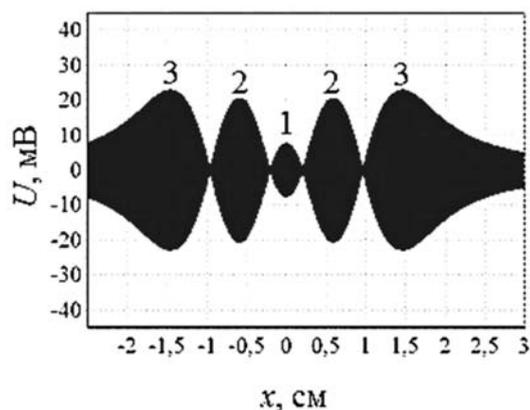


Рис. 3. Оптические изображения магнитных полей пластин МН, установленных друг к другу под углом π рад

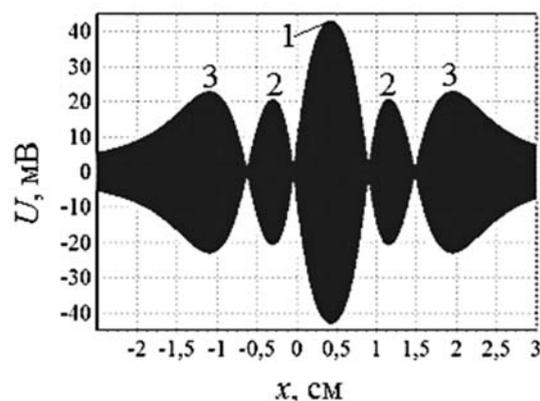


Рис. 4. Оптические изображения магнитных полей пластин МН, установленных друг к другу под углом $\pi/2$ рад

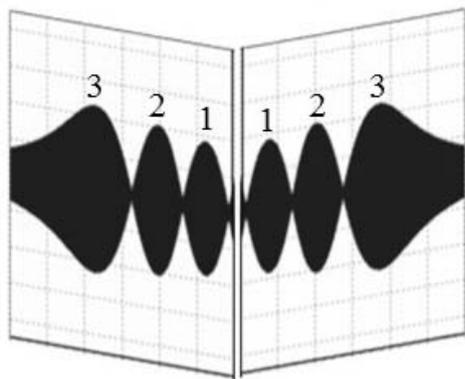


Рис. 5. Оптические изображения магнитных полей пластин МН, установленных друг к другу под углом $7\pi/8$ рад

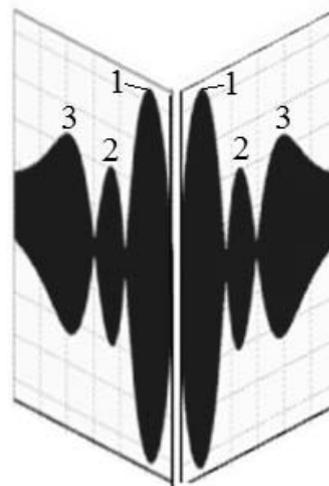


Рис. 6. Оптические изображения магнитных полей пластин МН, установленных друг к другу под углом $\pi/2$ рад

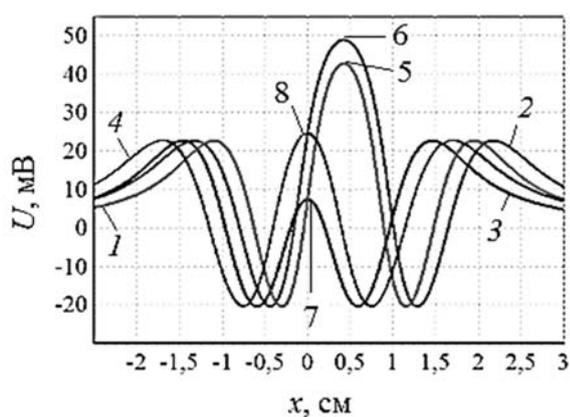


Рис. 7. Зависимости $U(x)$: 1 (π) и 2 ($\pi/2$) – без объекта; 3 (π) и 4 ($\pi/2$) – с алюминием; 5–8 – максимумы сигнала

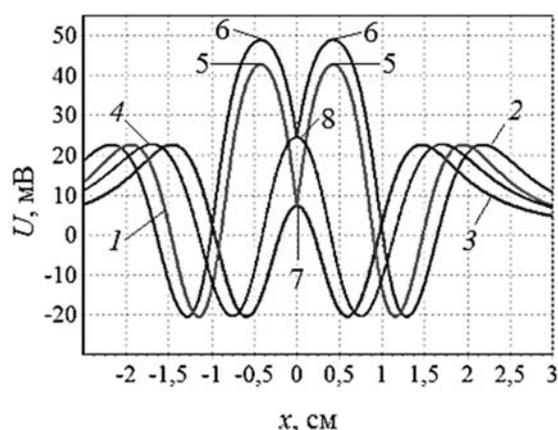


Рис. 8. Зависимости $U(x)$: 1 (π) и 2 ($\pi/2$) – без объекта; 3 (π) и 4 ($\pi/2$) – с алюминием; 5–8 – максимумы сигнала

Из рис. 8 следует, что произошло увеличение центрального максимума зависимости 3 с 27 мВ (7) до 44 мВ (8) зависимости 4, а максимумов зависимости 1 – с 63 мВ (5) до 70 мВ (6) зависимости 2. Несмотря на то, что максимумы 6 зависимости 2 не соответствуют точке $x = 0$, они также являются центральными максимумами, т. к. соответствуют проекции оси индуктора на плоскость пластин МН. Ввиду практически неисчерпаемого количества вариантов составления серии из трех импульсов по амплитуде, знаку и времени нарастания можно получать разные соотношения максимумов интерференции в интервале от -54 до 54 мВ.

Выводы. Разработан и осуществлен метод контроля объектов сложной формы в импульсном магнитном поле с использованием гистерезисной интерференции магнитного носителя, позволяющий повысить точность и

чувствительность определения удельной электропроводности материала объектов, их геометрических размеров, толщины и ориентации в пространстве по сравнению с безгистерезисными методами.

Метод позволяет находить алгоритмы оптимальных вариантов параметров воздействующих импульсов для определения свойств объектов с максимальной чувствительностью и точностью.

Метод контроля разработан на основании представленных результатов расчетов распределений электрического напряжения $U(x)$, снимаемого с магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями полей линейного индуктора, от пространственной координаты x , а также на основании полученных зависимостей $U(x)$ для пластин из магнитного носителя, установленных друг к другу под углами $7\pi/8$, $\pi/2$ и π рад с формированием оптических изображений зависимостей $U(x)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pavlyuchenko, V. V.** Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, № 12. – P. 949–956.
2. **Pavlyuchenko, V. V.** Computer-assisted methods for finding pulsed magnetic-field distributions near current-conducting objects / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 5, № 3. – P. 166–174.
3. **Pavlyuchenko, V. V.** Calculation of residual magnetic-field distributions upon hysteretic interference of a pulsed magnetic field / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 8–16.
4. **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.
5. **Печенков, А. Н.** Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду / А. Н. Печенков, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 2016. – № 4. – С. 48–55.
6. **Терехин, И. В.** Контроль удельной электропроводности двухслойных немагнитных объектов импульсным вихретоковым методом / И. В. Терехин, Е. А. Славинская // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 30–36.
7. **Егоров, А. В.** Вихретоковый контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных / А. В. Егоров, В. В. Поляков // Дефектоскопия. – 2018. – № 5. – С. 55–62.
8. **Козлов, В. С.** Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.
9. **Фалькевич, А. С.** Магнитографический контроль сварных соединений / А. С. Фалькевич, М. Х. Хусанов. – Москва: Машиностроение, 1966. – 176 с.
10. **Pavlyuchenko, V. V.** Differential Background of Electric Signal Readfrom an Induction Magnetic Head / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 8. – P. 706–716.
11. **Павлюченко, В. В.** Контроль дефектов в прошедшем через металл импульсном магнитном поле / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2021. – № 10. – С. 25–33.
12. **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.

УДК 620.179.14

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОРПУСНОЙ СТАЛИ 20ГН С РАЗЛИЧНЫМ ИСХОДНЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИ УПРУГОМ РАСТЯЖЕНИИ

А. М. ПОВОЛОЦКАЯ, А. Н. МУШНИКОВ

Институт машиноведения УрО РАН

Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

EVOLUTION OF THE MAGNETIC PARAMETERS OF 20GN HULL STEEL SPECIMENS WITH DIFFERENT INITIAL STRESS-STRAIN STATES UNDER ELASTIC TENSION

A. M. POVOLOTSKAYA, A. N. MUSHNIKOV

Аннотация. В работе представлены результаты изучения особенностей поведения магнитных характеристик образцов из корпусной стали 20ГН, предварительно пластически деформированных растяжением на различные степени, в условиях последующего упругого одноосного растяжения. Показано, что рассматриваемые в работе параметры магнитного гистерезиса с ростом приложенных напряжений изменяются немонотонно, с образованием экстремумов. Величины приложенных напряжений, при которых формируются эти экстремумы, зависят от уровня остаточных напряжений сжатия, наведенных предварительным пластическим нагружением вдоль направления его действия. Сопоставлены результаты измерений гистерезисных и магнитострикционных свойств предварительно пластически деформированной растяжением исследуемой стали при последующем упругом одноосном растяжении.

Ключевые слова: упругое одноосное растяжение, магнитострикция, дифференциальная магнитная проницаемость.

Abstract. The paper presents on the results of studying the peculiarities of magnetic behavior of 20GN hull steel specimens preliminary plastically tensioned to various levels under subsequent elastic uniaxial tension. It is shown that the magnetic hysteresis parameters vary nonmonotonically with increasing applied stresses, with the formation of extrema. The values of applied stresses at which these extrema are formed depend on the level of residual compressive stresses induced by plastic preloading along the direction of its action. The results of measurements of the hysteretic and magnetostrictive properties of the steel under study preliminarily plastically deformed by tension under subsequent elastic uniaxial tension are compared.

Keywords: elastic uniaxial tension, magnetostriction, differential magnetic permeability.

Работа направлена на изучение влияния предварительного деформирования растяжением до различных уровней пластической деформации в широком диапазоне (вплоть до 17,5 %) корпусной стали 20ГН на закономерности поведения ряда ее магнитных характеристик, в том числе и магнитострикции, при последующем упругом одноосном растяжении с целью выявления характера наведенной таким силовым воздействием магнитной анизотропии, а также определения взаимосвязи гистерезисных и магнитострикционных свойств

исследуемой стали в условиях упругого деформирования растяжением.

Для исследований из стали 20ГН были вырезаны плоские образцы с головками. Образцы сечением 5×10 мм имели рабочую часть длиной 60 мм. На первом этапе образцы подвергали одноосному растяжению до значений пластической деформации ε : 0,75 %; 1,28 %; 1,96 %; 5,01 %; 7,53 %; 10 %; 12,5 %; 15,1 % и 17,5 %. Один образец оставили в исходном состоянии ($\varepsilon = 0$ %). На втором этапе предварительно пластически деформированные образцы подвергали одноосному упругому растяжению на испытательной машине УММ-5.

На рис. 1, а приведены полевые зависимости линейной продольной магнитострикции λ для образцов, испытанных на пластическое растяжение на различные степени. Для образца в исходном состоянии ($\varepsilon = 0$) магнитострикция с увеличением напряженности магнитного поля H сначала возрастает до максимума λ_{\max} , затем уменьшается, достигает нулевого значения и продолжает уменьшаться уже с отрицательным знаком. Для образцов, подвергнутых пластическому нагружению, при всех значениях напряженности магнитного поля $\lambda(H)$ положительна. При этом с ростом ε до значения 1,96 % существенно увеличивается площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и, как видно на рис. 1, б, значительно возрастает величина максимума магнитострикции λ_{\max} . При дальнейшем увеличении ε от 1,96 % до 7,53 % площадь положительного участка $\lambda(H)$ и величина ее максимума практически не изменяются, а при достижении 10 % – начинают снижаться.

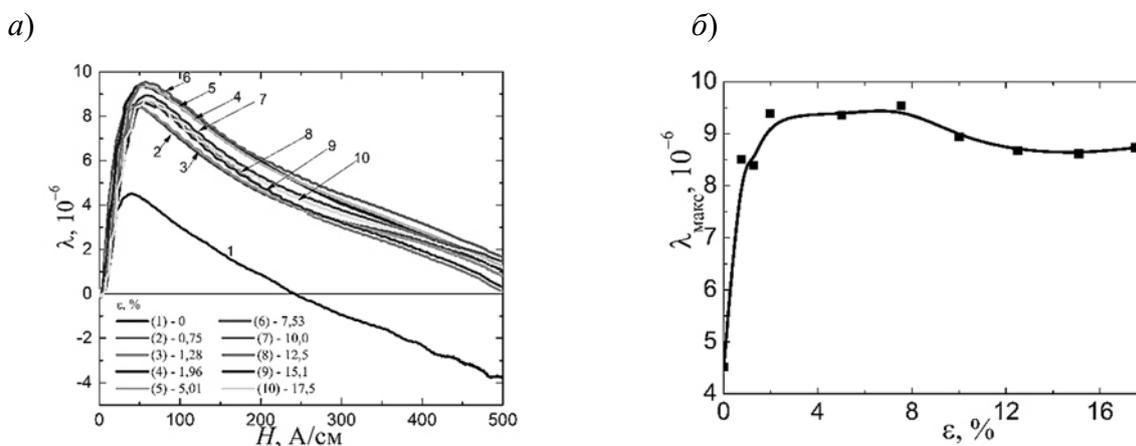


Рис. 1. Полевые зависимости линейной продольной магнитострикции λ образцов: а – зависимости $\lambda(H)$ образцов, пластически деформированных на различные степени ε ; б – зависимость $\lambda_{\max}(\varepsilon)$

Поведение $\lambda(H)$ для образцов, подвергнутых пластическому деформированию, характерно для поведения кривых магнитострикции при одноосном статическом сжатии [1–3] и является следствием формирования остаточных сжимающих напряжений различного уровня в направлении действия проведенной пластической деформации и возникновения текстуры типа «плоскость легкого намагничивания». При $\varepsilon = 10$ % величина λ_{\max} уменьшается. Вероятно, это обусловлено тем, что уровень остаточных сжимающих напряжений,

достигнув своего предельного значения, при деформациях $\varepsilon \approx 10\%$ начинает снижаться.

На рис. 2 показаны зависимости магнитных характеристик образцов от приложенных напряжений σ при упругом растяжении после их предварительного пластического растяжения на различные степени ε . С увеличением σ коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и максимальная магнитная проницаемость μ_{\max} всех образцов, одноосно деформированных до различной величины пластической деформации, изменяются с образованием экстремумов различной степени «выраженности». Наблюдаемое смещение экстремумов на зависимостях $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ для образцов, пластически деформированных растяжением до различных уровней ε , обусловлено различным уровнем остаточных напряжений, вносимых предварительным пластическим нагружением.

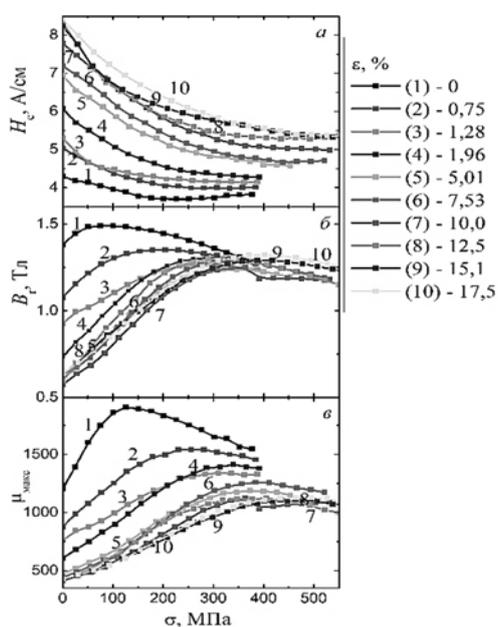


Рис. 2. Зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы (а), остаточной индукции (б) и максимальной магнитной проницаемости (в), измеренных на образцах, предварительно пластически деформированных на различные степени ε

На рис. 3 приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, не подвергнутого предварительно пластической деформации растяжением ($\varepsilon = 0$), при различных значениях приложенных растягивающих напряжений σ . С увеличением растягивающих напряжений σ до величины $\sigma_{\text{extr}} = 150,9$ МПа высота пика $\mu_{\text{диф max}}$ сначала увеличивается, при этом расположение пика смещается в сторону более слабых полей, а при дальнейшем увеличении растягивающих напряжений уменьшается по величине, и расположение пика продолжает смещаться в сторону более слабых полей.

Полевые зависимости магнитострикции λ при растягивающей нагрузке различной величины для того же образца приведены на рис. 4. С ростом σ положительный участок $\lambda(H)$ уменьшается и при величине напряжений,

превышающей $\sigma_{\text{sign}} = 150,9$ МПа, совсем исчезает, а магнитострикция принимает только отрицательные значения. При нагрузках, не превышающих σ_{sign} , формируется магнитная текстура типа «ось легкого намагничивания», при которой векторы намагниченности выстраиваются преимущественно вдоль направления легкого намагничивания, ближайшего к оси растяжения, т. е. вдоль направления намагничивающего и перемагничивающего поля, что облегчает процессы перемагничивания. Когда магнитострикция принимает только отрицательные значения ($\sigma > \sigma_{\text{sign}}$), в процессе растяжения идет образование магнитной текстуры типа «плоскость легкого намагничивания», при которой векторам спонтанной намагниченности энергетически выгоднее выстроиться перпендикулярно оси растяжения и, соответственно, намагничивающему и перемагничивающему полю, что затрудняет процессы перемагничивания. Поэтому изменение характера полевой зависимости продольной магнитострикции под действием упругого одноосного нагружения и определяет особенности поведения магнитных характеристик под действием тех же нагрузок. В результате изменения типа магнитной текстуры при растягивающих напряжениях, где произошла смена знака магнитострикции, на зависимостях гистерезисных магнитных параметров $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$, $\mu_{\text{max}}(\sigma)$ и максимумов $\mu_{\text{диф}}(H)$ от растягивающих напряжений формируются экстремумы.

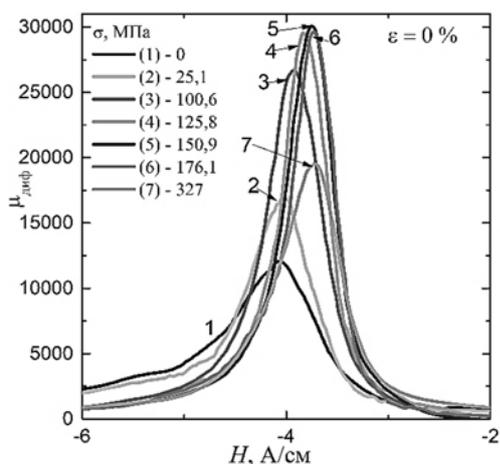


Рис. 3. Зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца с $\varepsilon = 0$ при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ

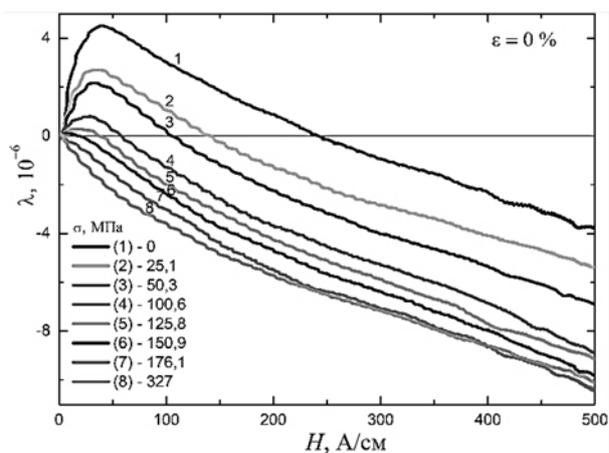


Рис. 4. Зависимости $\lambda(H)$ для образца с $\varepsilon = 0$ при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ

В качестве примера на рис. 5–7 показаны полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ и соответствующие им полевые зависимости продольной магнитострикции при растягивающей нагрузке различной величины для образцов, предварительно деформированных растяжением до уровней пластической деформации 5,01 %; 10 % и 15,1 %. Проведено сопоставление величин приложенных напряжений σ_{sign} , при превышении которых полевые зависимости магнитострикции становятся отрицательными, и величин приложенных напряжений σ_{extr} , при которых формируются

экстремумы на зависимостях гистерезисных характеристик при упругом деформировании. Экспериментально показано совпадение величин σ_{extr} и σ_{sign} .

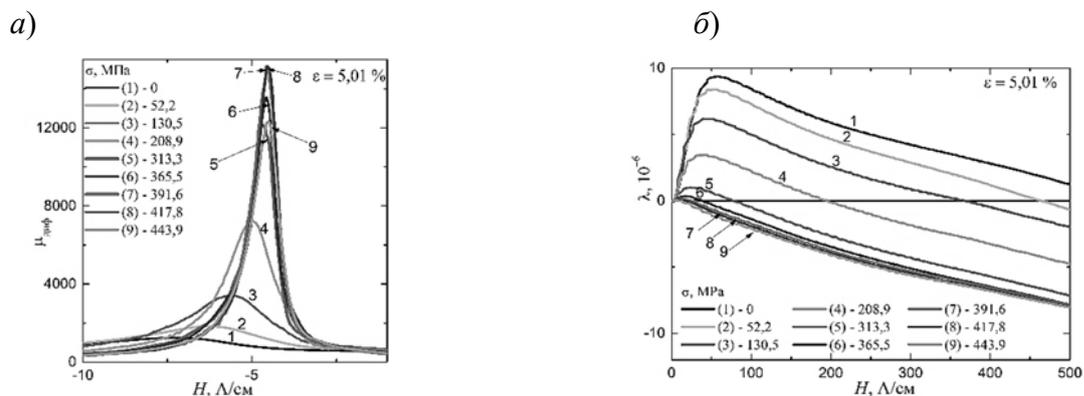


Рис. 5. Зависимости $\mu_{diff}(H)$ (a) и $\lambda(H)$ (б) при различных величинах σ для образца, пластически деформированного на степень $\epsilon = 5,01\%$

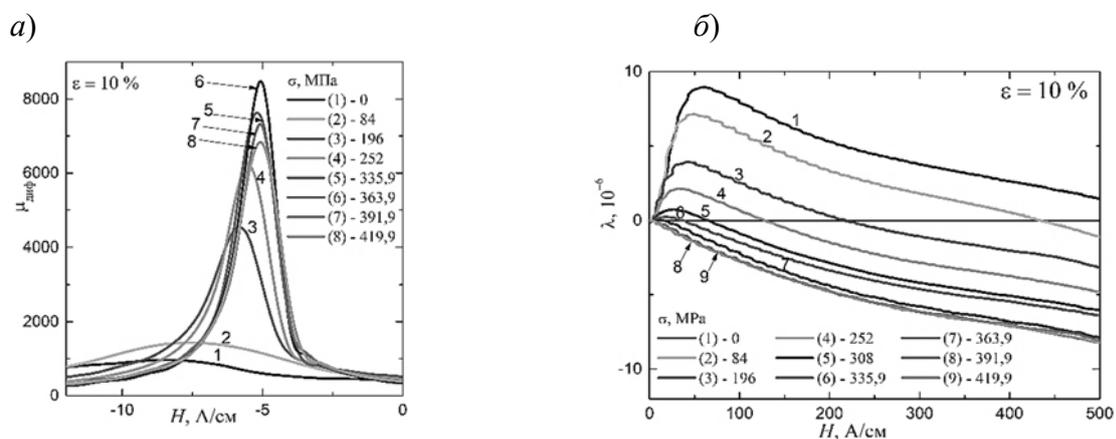


Рис. 6. Зависимости $\mu_{diff}(H)$ (a) и $\lambda(H)$ (б) при различных величинах σ для образца, пластически деформированного на степень $\epsilon = 10\%$

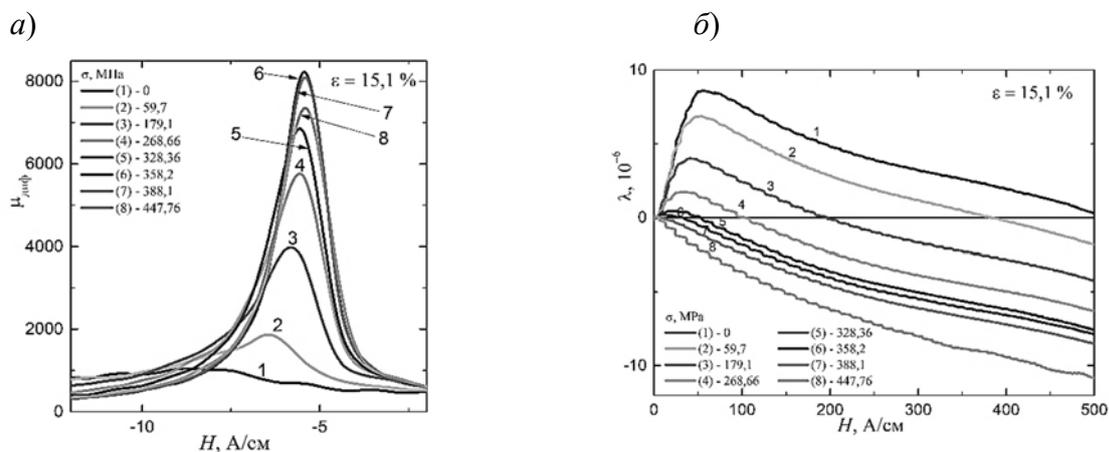


Рис. 7. Зависимости $\mu_{diff}(H)$ (a) и $\lambda(H)$ (б) при различных величинах σ для образца, пластически деформированного на степень $\epsilon = 15,1\%$

Таким образом, закономерности изменения полевых зависимостей магнито-стрикции пластически деформируемой растяжением на различные степени корпусной стали 20ГН подтверждают факт формирования в образцах в направлении пластической нагрузки остаточных напряжений сжатия различного уровня.

Предыстория в виде предварительной пластической деформации накладывает свой отпечаток на закономерности изменения магнитных параметров материала при его последующем упругом деформировании. Величины приложенных напряжений, при которых формируются экстремумы на зависимостях гистерезисных магнитных параметров от приложенных напряжений, зависят от уровня наведенных предварительным пластическим нагружением остаточных напряжений сжатия.

Сопоставление результатов измерений гистерезисных и магнито-стрикционных свойств предварительно пластически деформированной растяжением на различные степени исследуемой стали 20ГН при последующем упругом деформировании показало, что диапазоны растягивающих напряжений, в которых происходит смена знака магнито-стрикции и, соответственно, смена типа магнитной текстуры, соответствуют диапазонам напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях магнитных параметров от растягивающей нагрузки.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горкунов, Э. С. Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магнито-стрикцию в продольном и поперечном направлениях / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2013. – № 10. – С. 40–52.
2. Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении / А. М. Поволоцкая [и др.] // Дефектоскопия. – 2019. – Т. 55, № 11. – С. 21–31.
3. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension / A. M. Povolotskaya [et al.] // Research in Nondestructive Evaluation. – 2021. – Vol. 32, № 6. – P. 276–294.

E-mail: anna.povolotskaya.68@mail.ru.

УДК 53.088

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА ВТОРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА***В. Ф. ПОЗДНЯКОВ, Е. В. ПОЗДНЯКОВА***

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 53.088

ESTIMATION OF THE ERROR OF THE OPTICAL PATH OF THE SECONDARY LASER INTERFEROMETER CONVERTER***V. F. POZDNIAKOV, E. V. POZDNIAKOVA***

Аннотация. Использование волоконно-оптических вторичных преобразователей для восприятия интерференционной картины позволяет упростить конструкцию устройства, вывести сигнал оптической информации за пределы самой оптической схемы. При этом любой элемент будет вносить определенную составляющую суммарной погрешности всего устройства в целом. В работе рассмотрен волоконно-оптический дискретный преобразователь как приемник периодического оптического сигнала и дана оценка погрешности, вносимой им в процесс измерения.

Ключевые слова: волоконно-оптический преобразователь, погрешность, уровень сигнала, функция распределения, погрешность дискретов.

Abstract. The use of fiber-optic secondary converters for the perception of the interference pattern makes it possible to simplify the design of the device to output the optical information signal beyond the optical circuit itself. At the same time, naturally, any element will contribute a certain component of the total error of the entire device as a whole. The paper considers a fiber-optic discrete converter as a receiver of a periodic optical signal and estimates the error introduced by it into the measurement process.

Keywords: fiber-optic converter, error, signal level, distribution function, sampling error.

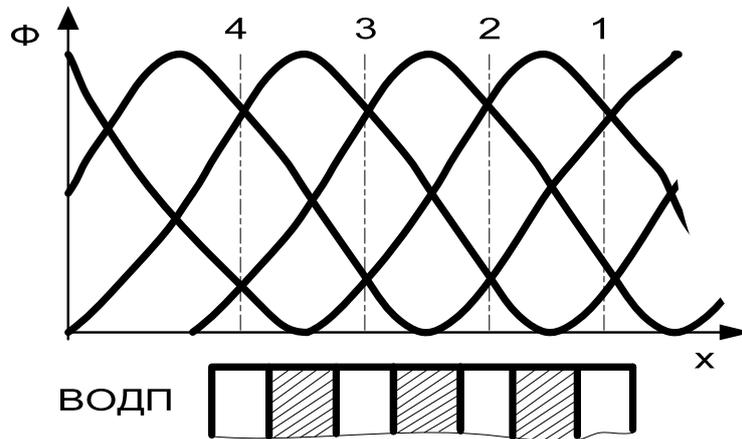
Для восприятия и преобразования периодического оптического сигнала в таких оптических приборах, как лазерный интерферометр или растровые преобразователи на основе муаровых полос с успехом могут использоваться волоконно-оптические дискретные преобразователи (ВОДП) [1, 3]. Они позволяют исключить из состава приборов такие элементы, как диафрагмы, поляризаторы, светоделительные элементы и тем самым упростить схему прибора и согласование с фотоэлектрическими преобразователями [4].

ВОДП набран из лент световодов, толщина которых меньше $1/4$ шага периодического оптического сигнала. Сдвиг фаз воспринимаемого оптического сигнала осуществляется установкой двух рядом расположенных световодов преобразователя на расстояние не равное периоду интерференционных или муаровых полос [2]. С энергетической точки зрения две полосы ВОДП должны быть сдвинуты на величину, равную половине шага полосы. Однако в этом случае теряется информация о направлении перемещения полос. Отсюда

следует, что линейки ВОДП должны иметь смещение в интервале $0 < t_{см} < \pi$. При этом должны выполняться следующие требования:

- количество дискретов ВОДП должно быть не менее двух;
- обязательное наличие двух уровней сигнала с целью согласования преобразователя с цифровыми устройствами обработки данных;
- равномерное расположение дискретов ВОДП относительно периода оптического сигнала;
- обеспечение наибольшей разности между максимальными и минимальными уровнями сигналов при фиксации энергетических состояний.

Приведенные требования могут быть выполнены с двумя, тремя или четырьмя дискретами ВОДП (большее количество не целесообразно из-за усложнения электронной схемы обработки измерительной информации). ВОДП с двумя и четырьмя дискретами практически равнозначны, поэтому рассмотрим два варианта: с тремя и четырьмя дискретами. На рис. 1 и 2 показаны схемы установки четырехдискретного и трехдискретного ВОДП.



Логическое состояние оптических сигналов					
1	0	0	1	1	Цена одного импульса для интерференционной картины $\lambda/8$
2	0	1	1	0	
3	1	1	0	0	
4	1	0	0	1	

Рис. 1. Схема расположения четырехдискретного ВОДП относительно периодического оптического сигнала

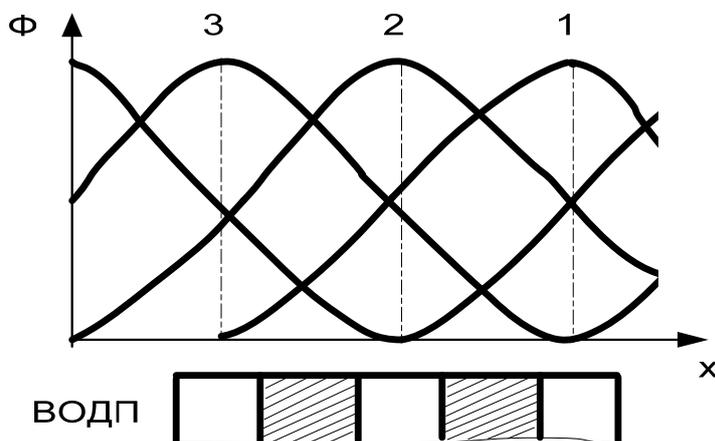
Рассмотрим разность уровней сигналов в ВОДП при разных вариациях. При четырех дискретах

$$U_4 = \cos \frac{\pi}{4} - \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) = \sqrt{2} . \quad (1)$$

При трех дискретах

$$U_3 = \cos 0 - \cos \frac{2\pi}{3} = 1,5. \quad (2)$$

Таким образом, при прочих равных условиях ВОДП с тремя дискретами позволяет получить большую разность уровней сигналов, тем самым повышает достоверность получаемой измерительной информации.



Логическое состояние оптических сигналов				
1	0	0	1	Цена одного импульса для интерференционной картины $\lambda/6$
2	0	1	1	
3	1	1	0	

Рис. 2. Схема расположения трехдискретного ВОДП относительно периодического оптического сигнала

Введение ВОДП требует оценки погрешности, вносимой данным элементом в суммарную погрешность оптического преобразователя.

Главным фактором, влияющим на погрешность ВОДП, является погрешность его изготовления Δ_c , определяемая как результат погрешности изготовления отдельных дискретов и их расположения Δ_i :

$$\sum_i^n = \Delta_i = \Delta_c. \quad (3)$$

При этом погрешность Δ_i , с учетом технологического разброса ширины дискретов h , имеет нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией. Тогда плотность вероятности

$$P(\Delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_0} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta_i^2}{2\sigma_0^2}\right). \quad (4)$$

Поскольку все значения Δ_i независимы, то плотность вероятности также описывается выражением

$$P(\Delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_0 \sqrt{k}} \exp \left[-\frac{\Delta_c^2}{2(2\sqrt{k} \cdot \sigma_0)} \right], \quad (5)$$

где k – число дискретов.

Из (5) следует, что $\sigma_k = \sqrt{k} \cdot \sigma_0$ возрастает с увеличением k . Очевидно, что погрешность всего ВОДП, определяемая значением σ_k , будет зависеть от k . Эта погрешность с принятым значением $P = 0,997$ не выйдет за пределы

$$|\Delta_k| < \frac{3}{2} \sigma_k. \quad (6)$$

Таким образом, считая заданным количество дискретов и полагая, что погрешность Δ_k (из технологических соображений) не должна превышать величины $h/5$, можно определить минимально допустимое h при известных отклонениях h' от h .

$$h' = h \pm \Delta_{\text{изг}},$$

где $\Delta_{\text{изг}}$ – допуск на толщину дискрета.

В этом случае

$$3\sigma = 2 |\Delta_{\text{изг}}|.$$

Требуемое условие выразится

$$3\sigma < 2 \left| \frac{h}{2} \right|; \quad 3\sigma < 0,4 h \quad (7)$$

или

$$3\sqrt{k} \cdot \sigma_0 < 0,4 h; \quad 2 \Delta_{\text{изг}} \sqrt{k} < 0,4 h; \quad h > 5 \sqrt{k} \cdot \Delta_{\text{изг}}. \quad (8)$$

Таким образом, выражение (8) определяет минимальную толщину дискрета в зависимости от их количества и допуска на изготовление.

Оценим погрешность, вносимую ВОДП, при условии, что две крайние линейки (дискрета) установлены точно относительно интерференционных полос. Тогда основная погрешность определяется накопленной погрешностью Δ_n изготовления отдельных дискретов и промежутков между ними. Полагая, что все отклонения имеют один знак, составим соотношения

$$\frac{\Delta_n}{t} = \frac{\Delta_B \cdot 2}{\lambda}; \quad \Delta_{\text{изг}} = \frac{h}{5\sqrt{k}},$$

где t – шаг интерференционной полосы; Δ_B – погрешность, вносимая ВОДП.

Учитывая, что $\Delta_n = \Delta_{\text{изг}} (k - 2)$, а $\Delta_{\text{изг}} = \frac{h}{5\sqrt{k}}$, находим

$$\Delta_B = \frac{\lambda \cdot h \cdot (k - 2)}{10t \cdot \sqrt{k}}.$$

Несмотря на то, что данная погрешность для ВОДП является систематической, для интерферометрических полос она является случайной, т. к. неизвестно с какого дискрета ВОДП начнется счет измерительных импульсов. Вследствие этого учесть ее как систематическую невозможно.

Для конкретных размеров ВОДП при $h = 0,4$ мм и $k = 5$ погрешность Δ_v составляет величину $0,15 \cdot 10^{-8}$ м, что значительно меньше разрешающей способности интерферометрического преобразователя.

Таким образом, ВОДП не вносит значительной погрешности в общую погрешность лазерного интерферометра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коломийцев, Ю. В.** Интерферометры / Ю. В. Коломийцев. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 296 с.
2. Устройство для измерения линейных перемещений: а. с. 1237906 / В. Ф. Поздняков [и др.]. – Оpubл. 15.06.1986.
3. **Фукс-Рабинович, Л. И.** Оптико-электронные приборы / Л. И. Фукс-Рабинович, М. В. Епифанцев. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 362 с.
4. **Зак, Е. А.** Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е. А. Зак. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.

УДК 681.324.6

ПЕРЕДВИЖНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Н. Н. ПОТРАХОВ, К. К. ГУК, В. Б. БЕССОНОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия

UDC 681.324.6

MOBILE X-RAY INSTALLATIONS FOR CONTROL OF MATERIALS AND INDUSTRIAL PRODUCTS

N. N. POTRAKHOV, K. K. GUK, V. B. BESSONOV

Аннотация. Благодаря высокой информативности, а также наглядности, оперативности проведения и неразрушающему характеру, рентгенографические методы имеют неоспоримое преимущество перед всеми другими известными методами контроля различных материалов и промышленных изделий. Использование результатов отечественных исследований в области микрофокусной рентгенографии позволяет принципиально снизить габариты, вес и энергопотребление источников рентгеновского излучения. В результате разработаны многофункциональные рентгенографические и рентгенотомографические установки нового класса в передвижном исполнении.

Ключевые слова: микрофокусная рентгенография, рентгеновский контроль и диагностика, передвижные рентгенографические и рентгенотомографические установки.

Abstract. Introduction: due to the high information content, as well as the visibility of the promptness and non-destructive nature of X-ray methods, they have an undeniable advantage over all known methods for testing various materials and industrial products. Using the results of domestic research in the field of microfocus radiography makes it possible to fundamentally reduce the size, weight, and power consumption of the X-ray sources used. As a result, multifunctional radiography and X-ray tomography units of a new class, portable and mobile, have been developed.

Keywords: microfocus radiography, X-ray control and diagnostics, mobile radiography and X-ray tomography units.

Введение. С момента своего открытия (1895 г.) и по сей день рентгеновское излучение широко используется для неразрушающего контроля различных материалов и промышленных изделий. Основными преимуществами рентгеновских методов контроля, в первую очередь, рентгенографических, являются высокие наглядность и информативность получаемых результатов, оперативность, а также относительная простота их реализации.

Последние достижения в области технологии аппаратных средств рентгенографии, в частности разработка цифровых приемников рентгеновского изображения, открыли новое направление рентгеноприборостроения – установки для рентгеновского контроля и диагностики в передвижном исполнении различного назначения.

Разработки отечественных передвижных (портативных) рентгенодиагностических установок (ПРДУ) были начаты в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» несколько лет назад. Основанием для них послужили результаты продолжительных исследований сотрудников кафедры электронных приборов и устройств (ЭПУ) в области микрофокусной рентгенографии, которая в настоящее время является международно признанным российским приоритетом.

Малые габариты, вес и энергопотребление при высоком качестве получаемых рентгеновских изображений позволяют проводить с помощью ПРДУ контроль самых разнообразных изделий непосредственно на месте их производства: в цехе, на монтажном участке или поточной линии сборки, научной или учебной лаборатории и т. д. С полным основанием можно утверждать, что ПРДУ превратились в незаменимый «настольный» инструмент инженера, технолога, научного работника и даже преподавателя вуза.

Современные технические средства рентгенографии и томографии. К настоящему времени сотрудниками кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на базе малого предприятия Технопарк университета ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» разработаны передвижные рентгенографические семейства ПРДУ и рентгенотомографические установки семейства МРКТ, предназначенные для целого ряда областей научной и практической деятельности [1].

Типовая конструкция установок обоих семейств включает в себя рентгенозащитную камеру (РЗК) для проведения рентгенографических работ, ИРИ моноблочного типа, цифровой ПРИ на основе плоскопанельного детектора РИ, персональный компьютер (ПК) с установленным специализированным программным обеспечением (ПО) и устройство для позиционирования (УП) объекта. Типы рентгеновской трубки и детектора РИ, а также конструкция и количество степеней перемещения УП зависят от форм-фактора ОИ и задач контроля.

Основные параметры установок семейства ПРДУ представлены в табл. 1.

Области применения рентгенографических и рентгенотомографических установок.

1. *Контроль изделий электронной техники.*

Ни одно из производств современной электронной техники не может обойтись без контроля качества ключевых технологических операций, например, «разварки» внутренних выводов диодов, транзисторов, микросхем и т. д. или паяных соединений печатных плат. Для решения указанных задач предназначены рентгенографические установки семейства ПРДУ в нескольких исполнениях (рис. 1).

Они успешно используются при входном контроле электронных компонентов и печатных плат, например, паяных соединений, выполненных по BGA-, QFN-, THT-технологиям, дефектов нанесения паяльной пасты, включая обнаружения пустот, перемычек и т. д., поиск посторонних элементов. Примеры получаемых рентгеновских изображений представлены на рис. 2.

Специализированная установка этого семейства – ПРОДИС.КОМПОНЕНТ (СК-01) используется для оперативного подсчета SMD-компонентов в катушках, пеналах, поддонах без вскрытия упаковок, а также обрезках лент [2].

Табл. 1. Основные параметры установок семейства ПРДУ

Параметр	ПРДУ-1.1	ПРДУ-1.2	ПРДУ-2.1	ПРДУ-2.2	«КРОС»	«РУНК-50»	«СК-01»
Напряжение, кВ	20...50	20...50	40...100	40...100	30	50	80
Ток, мА	0,1	0,1	0,1	0,1	10	2	0,7
Размер фокусного пятна, мкм	Ø 20	Ø 20	Ø 20	Ø 20	100 × 100	Ø 100	500 × 500
Размер входного окна приемника, мм	240 × 300	350 × 470	240 × 300	350 × 470	20 × 30	150 × 240	430 × 430
Размер пикселя приемника, мкм	140	140	140	140	100	50	140
Разрешающая способность, мкм	5	5	5	5	-	50	140
Размеры объекта исследования, мм	100 × 220 × × 280	150 × 320 × × 450	100 × 220 × × 280	150 × 320 × × 450	100 × 200 × × 300	Ø 100 × 400	400 × 400 × × 100
Мощность, Вт	300	400	400	500	1000	1000	1000
Габаритные размеры, мм	420 × 420 × × 650	620 × 620 × × 850	420 × 420 × × 650	620 × 620 × × 850	200 × 700 × × 700	1100 × 1100 × × 1500	660 × 700 × × 1270
Вес, кг	90	120	140	180	120	165	250



Рис. 1. Рентгенографические установки семейства ПРДУ



Рис. 2. Рентгеновское изображение фрагментов печатных плат

Для получения трехмерных рентгеновских изображений изделий электронной техники используются микрофокусные рентгеновские компьютерные томографические установки семейства МРКТ. Внешний вид одной из установок этого семейства – томографа МРКТ-04 – представлен на рис. 3.



Рис. 3. Микрофокусный рентгеновский компьютерный томограф МРКТ-04

В качестве примера результатов исследований, выполненных на томографе МРКТ-04, на рис. 4 представлено трехмерное рентгеновское изображение одного из изделий отечественной электронной техники – диода Ганна. Диаметр проволочных выводов равен 20 мкм.

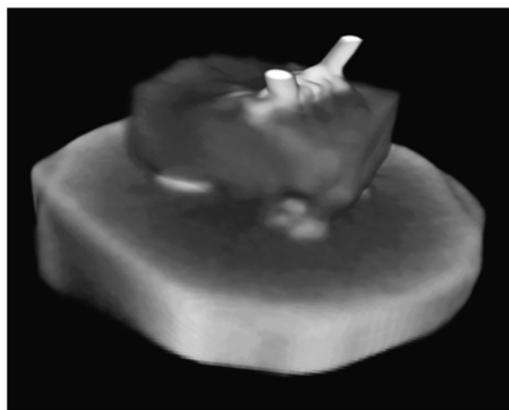


Рис. 4. Трехмерное рентгеновское изображение диода Ганна

2. Контроль кристаллографической ориентации и разориентации субзерен в монокристаллических изделиях.

Технологический процесс изготовления монокристаллических лопаток, современных газотурбинных двигателей требует контроля кристаллографической ориентации основного кристалла и разориентации возможных субзерен в отливке лопатки.

Для проведения этих операций разработана специализированная рентгеновская установка ПРДУ «КРОС», в которой реализован симметричный метод Лауэ в режиме обратной съемки [3]. Внешний вид установки представлен на рис. 5.

3. Контроль качества кабельных соединений.

Надежность и долговечность современных информационных или силовых кабельных линий в значительной мере обеспечиваются качеством выполнения технологических операций при сборке (изготовлении) кабельных соединений. Соединение двух отрезков кабеля является наиболее сложной из таких операций, поскольку проводится чаще всего в полевых условиях. Практика показывает, что на соединительные или концевые кабельные муфты приходится до 75 % всех дефектов.

Для проведения контроля качества кабельных муфт непосредственно на месте их сборки разработана специализированная рентгеновская установка РУКН-50 [4]. Установка позволяет определить герметичность соединения двух отрезков кабеля, наличие и отсутствие воздушных пузырей или металлических включений непосредственно на месте их сборки, например на борту судна-кабелеукладчика. Внешний вид установки представлен на рис. 6.



Рис. 5. Специализированная рентгеновская установка ПРДУ «КРОС»



Рис. 6. Специализированная рентгеновская установка РУКН-50

Заключение. Нарботанный опыт создания и эксплуатации современных технических средств рентгенографии показывает, что сформировался новый

класс оборудования для рентгеновского контроля и диагностики – портативные рентгенографические и рентгенотомографические установки. Так, диагностические возможности отечественного портативного томографа МРКТ-04, позволяют решать большинство задач, до недавнего времени посильных лишь зарубежным стационарным системам рентгеновского контроля. Однако использование оригинальных технических решений и ключевых комплектующих отечественного производства позволило принципиально снизить габариты, вес и, самое главное, стоимость. В результате дорогостоящая стационарная система рентгеновского контроля превратилась в «настольный» инструмент, подобно известному всем специалистам и радиолюбителям тестеру для измерения параметров радиоэлектронных схем, электрических сетей и т. д.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микрофокусная рентгенография: результаты исследований Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова / Н. Н. Потрахов [и др.] // Территория NDT. – 2016. – № 3. – С. 54.
2. Рентгеновский счетчик компонентов ПРОДИС.КОМПОНЕНТ [Электронный ресурс] / ПРОДИС.НДТ. – Режим доступа: <https://prodis-tech.ru/>. – Дата доступа: 29.06.2022.
3. Установка ПРДУ «КРОС» для экспрессного определения кристаллографической ориентации кубических монокристаллов по обратным лауэграммам / Н. Н. Потрахов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 8. – С. 27–30.
4. Специализированная рентгеновская установка РУКН-50 [Электронный ресурс] / ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед». – Режим доступа: <https://eltech-med.com/ru/catalog?prod=26>. – Дата доступа: 12.07.2022.

E-mail: nn@eltech-med.com, kzhamova@gmail.com, vbbessonov@yandex.ru.

УДК 620.172

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ И РЕЖИМОВ ИХ ПОСТОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКЦИИ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Т. А. ПРОТАСЕНЯ¹, А. П. КРЕНЬ¹, Г. А. ЛАНЦМАН¹, Г. Н. ДЬЯКОВА²

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

²Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

UDC 620.172

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF 3D-PRINTING PARAMETERS OF POLYMER PRODUCTS AND THEIR POST-PROCESSING MODES ON THE PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS

T. A. PRATASENIA, A. P. KREN, G. A. LANTSMAN, H. N. DYAKOVA

Аннотация. Рассмотрено влияние параметров 3D-печати изделий аддитивного производства по FDM-технологии и режимов постобработки изделий SLA-печати на их физико-механические характеристики. Установлено, что зависимости изменения модуля упругости E и предела прочности σ материала от температуры, скорости и толщины слоя при FDM-печати, а также режимов доотверждения образцов SLA-печати (времени выдержки и мощности УФ-излучения), могут быть представлены в виде трехмерных поверхностей и с достаточной для инженерных расчетов точностью описаны аналитическими уравнениями, позволяющими прогнозировать свойства изготавливаемых изделий, либо подобрать необходимый режим печати и постобработки для получения материала с требуемым набором эксплуатационных характеристик. Полученные результаты являются основой для развития методов неразрушающего контроля продукции аддитивного производства и расширения области применения метода динамического индентирования для контроля полимерных изделий, полученных по FDM- и SLA-технологиям.

Ключевые слова: аддитивные технологии, модуль упругости, предел прочности, постобработка, неразрушающий контроль.

Abstract. The influence of 3D-printing parameters of additive manufacturing products using FDM technology and post-processing modes of SLA-printed products on their physical and mechanical characteristics is considered. It has been established that the dependences of the change in the elastic modulus and tensile strength of the material on temperature, speed and layer thickness during FDM printing, as well as the modes of post-curing of SLA-printed samples (exposure time and UV radiation power) can be represented as three-dimensional surfaces and with sufficient for engineering calculations, the accuracy is described by analytical equations that make it possible to predict the properties of manufactured products, or to select the necessary printing and post-processing mode to obtain a material with the required set of performance characteristics. The results obtained are the basis for the development of methods for non-destructive testing of additive manufacturing products and for expanding the scope of the dynamic indentation method for testing polymer products obtained using FDM and SLA technologies.

Keywords: additive technologies, modulus of elasticity, tensile strength, post-processing, non-destructive testing.

Развитие современных технологий производства сложных и ответственных изделий машиностроения, авиационной, атомной и медицинской промышленности неразрывно связано с широким внедрением технологий 3D-печати (аддитивного синтеза). Однако для технологий послойного выращивания изделий характерна сильная зависимость их физико-механических свойств от заданных параметров печати и последующих условий протекания реакций модификации структуры материала, т. е. режимов постобработки.

Как правило, нестабильность заданных условий изготовления изделия приводит к неравномерному распределению свойств внутри его слоев. Например, материал, получающий более высокую дозу облучения при лазерной стереолитографии (SLA-технология), либо имеющий более высокую температуру на выходе из сопла экструдера при послойном наплавлении (FDM-технология), демонстрирует и более высокую плотность сшивки, что приводит к неравномерной межслоевой адгезии и, как следствие, к пространственному изменению физико-механических характеристик материала и возникновению внутренних напряжений. На макроуровне все это может быть дифференцировано как анизотропия свойств полимерного материала, которая в той или иной степени может изменяться не только от условий и параметров печати, но и от геометрии создаваемого изделия, и даже от его расположения на столе 3D-принтера.

Улучшить характеристики изделий, полученных путем аддитивных технологий, удастся различными способами постобработки (УФ-излучение, отжиг), что на первый взгляд решает вопрос улучшения свойств материала, но также может привести к неравномерной деградации внешних слоев изделия.

В настоящее время физико-механические свойства изделий аддитивного синтеза определяются исключительно в ходе стандартных разрушающих испытаний с обязательным изготовлением образцов-свидетелей по тем же технологиям и режимам печати, что и основное изделие. Это приводит к излишним временным и материальным затратам, и при этом не гарантирует, что установленные свойства материала образцов идентичны физико-механическим характеристикам готового изделия. Кроме того, вариативность задания параметров печати и способов создания изделия (даже в рамках одной технологии производства) определяет необходимость в оперативном безобразцовом контроле свойств, позволяющем в режиме реального времени корректировать параметры печати и адаптировать готовое изделие под требования заказчика. Поэтому вопросам разработки и развития методов неразрушающего контроля, способных дать численную оценку физико-механическим характеристикам материалов изделий аддитивного синтеза, в настоящее время во всем мире уделяется первостепенное внимание.

Целью данного этапа исследования являлся анализ влияния различных параметров 3D-печати и режимов постобработки на модуль упругости E и предел прочности σ изделий аддитивного синтеза, полученных по SLA-технологии из фотополимерной смолы Formlabs Clear Resin V4 (Formlabs Inc., США) и методами FDM-печати из полиамида Fiberforce Carbon Fiber (Fiberforce, Италия). При этом действительные значения указанных физико-механических характеристик

образцов предложено оценивать посредством стандартных испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 34370–2017 [1]. Полученные результаты будут являться основой для адаптации одного из современных и наиболее интенсивно развивающихся в настоящее время методов неразрушающего контроля – динамического индентирования для оценки физико-механических характеристик полимерных изделий аддитивного производства и позволят разработать методики неразрушающего оперативного контроля их прочностных и упругих свойств [2].

Изготовление образцов для проведения исследования проводилось в Белорусском государственном технологическом университете (г. Минск) в соответствии с требованиями [1]. Печать изделий по FDM-технологии осуществлялась на 3D-принтере «Sharebot» (Sharebot, Италия) с послойной укладкой филамента при печати под углом $\pm 45^\circ$ относительно оси образца и 100-процентным заполнением шаблона. Изменению подлежали следующие параметры печати: скорость печати v (55, 70 и 85 мм/с), толщина слоя h (от 0,1; 0,2 и 0,3 мм) и температура печати T (240 °С, 255 °С и 270 °С).

Выращивание образцов по SLA-технологии проводилось на 3D-принтере Form2 (Formlabs Inc., США), при этом мощность лазера составляла 250 мВт, размер пятна лазера – 140 мкм, температура смолы – 31 °С. Доотверждение образцов проводилось под действием УФ-излучения мощностью W , равной 36, 39 и 48 Вт, на протяжении времени t от 15 до 60 мин.

Таким образом, на предварительном этапе исследования было подготовлено 35 образцов, изготовленных по FDM-технологии (по пять образцов для каждого сочетания изменяемых параметров печати), и 25 образцов, изготовленных по SLA-технологии. Все образцы были испытаны на растяжение на универсальной испытательной машине MTS Criterion 43 с непрерывной скоростью нагружения 10 мм/мин при температуре воздуха (20 ± 2) °С и относительной влажности воздуха (70 ± 5) %. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Приняв неизменным один из параметров выращивания изделия по FDM-технологии (скорость, температуру или толщину слоя печати), полученные результаты могут быть представлены в виде поверхности, т. е. зависимости изменения модуля упругости E или предела прочности σ от тех или иных параметров печати. Ниже приведены примеры подобных зависимостей при фиксированной температуре печати 255 °С (рис. 1) и толщине слоя 0,2 мм (рис. 2).

Аналогичным образом могут быть получены зависимости изменения физико-механических характеристик полимерных изделий, выращенных по SLA-технологии (рис. 3).

При этом представленные зависимости достаточно точно (с коэффициентом корреляции не ниже 0,99) могут быть описаны аналитическими уравнениями, общий вид которых и возможные коэффициенты также приведены на рис. 1–3. Основным преимуществом полученных зависимостей является возможность прогнозировать физико-механические свойства полимерных изделий аддитивного синтеза в зависимости от заданных параметров 3D-печати, либо целе-

направленно подбирать параметры печати для получения материала с требуемым набором эксплуатационных характеристик.

Табл. 1. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по FDM-технологии

Фиксируемый параметр печати	Вариативный параметр печати	Статистический показатель	E , ГПа	σ , МПа
$v = 70$ мм/с, $T = 255$ °С	$h = 0,1$ мм	Среднее по пяти образцам	1,81	45,73
		Коэффициент вариации, %	3,22	2,52
	$h = 0,2$ мм	Среднее по пяти образцам	1,66	39,81
		Коэффициент вариации, %	9,81	1,92
	$h = 0,3$ мм	Среднее по пяти образцам	1,30	39,75
		Коэффициент вариации, %	1,46	1,37
$h = 0,2$ мм, $T = 255$ °С	$v = 55$ мм/с	Среднее по пяти образцам	1,73	41,20
		Коэффициент вариации, %	2,60	3,39
	$v = 85$ мм/с	Среднее по пяти образцам	1,66	39,83
		Коэффициент вариации, %	1,81	0,91
$v = 70$ мм/с, $h = 0,2$ мм	$T = 240$ °С	Среднее по пяти образцам	1,04	36,63
		Коэффициент вариации, %	4,02	2,04
	$T = 270$ °С	Среднее по пяти образцам	40,25	1,25
		Коэффициент вариации, %	2,18	2,19

Табл. 2. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по SLA-технологии

t , мин	Статистический показатель	$W = 36$ Вт		$W = 39$ Вт		$W = 48$ Вт	
		E , ГПа	σ , МПа	E , ГПа	σ , МПа	E , ГПа	σ , МПа
15	Среднее по пяти образцам	–	–	1,66	29,02	–	–
	Коэффициент вариации, %	–	–	4,01	6,08	–	–
30	Среднее по пяти образцам	–	–	2,10	29,87	–	–
	Коэффициент вариации, %	–	–	5,11	3,95	–	–
60	Среднее по пяти образцам	2,35	28,37	2,40	34,99	2,11	34,54
	Коэффициент вариации, %	1,27	8,20	5,49	6,95	11,79	1,34

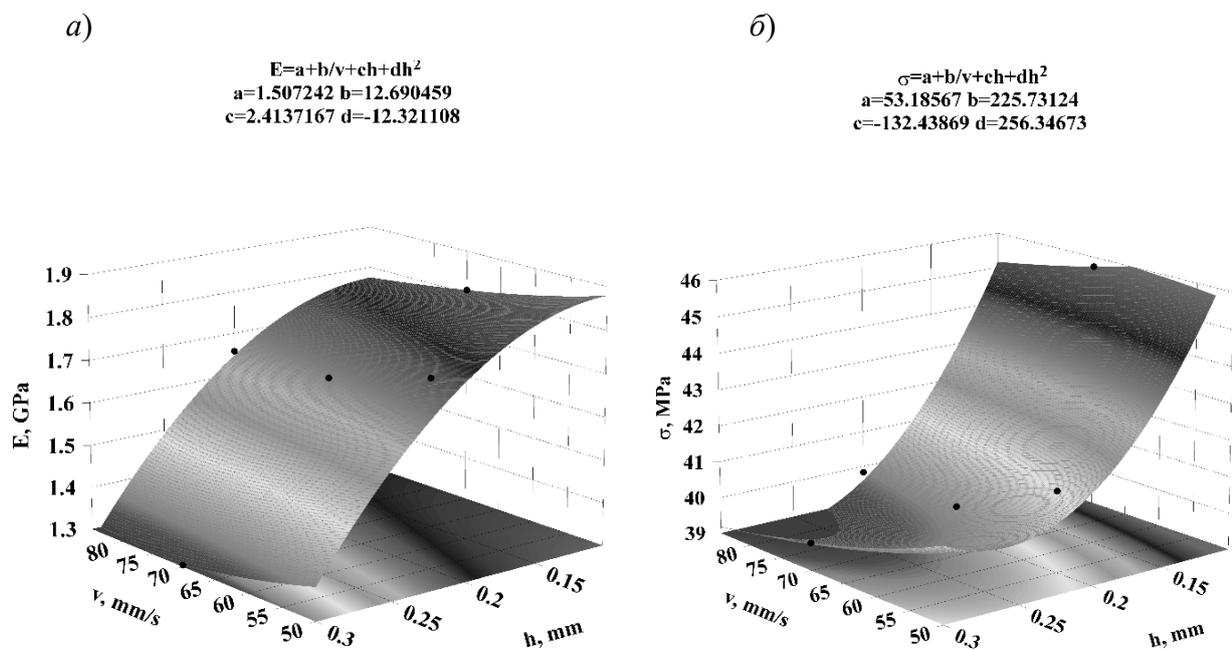


Рис. 1. Зависимость изменения модуля упругости E (a) и предела прочности σ (б) полимерного материала от скорости и толщины слоя FDM-печати при температуре 255 °C

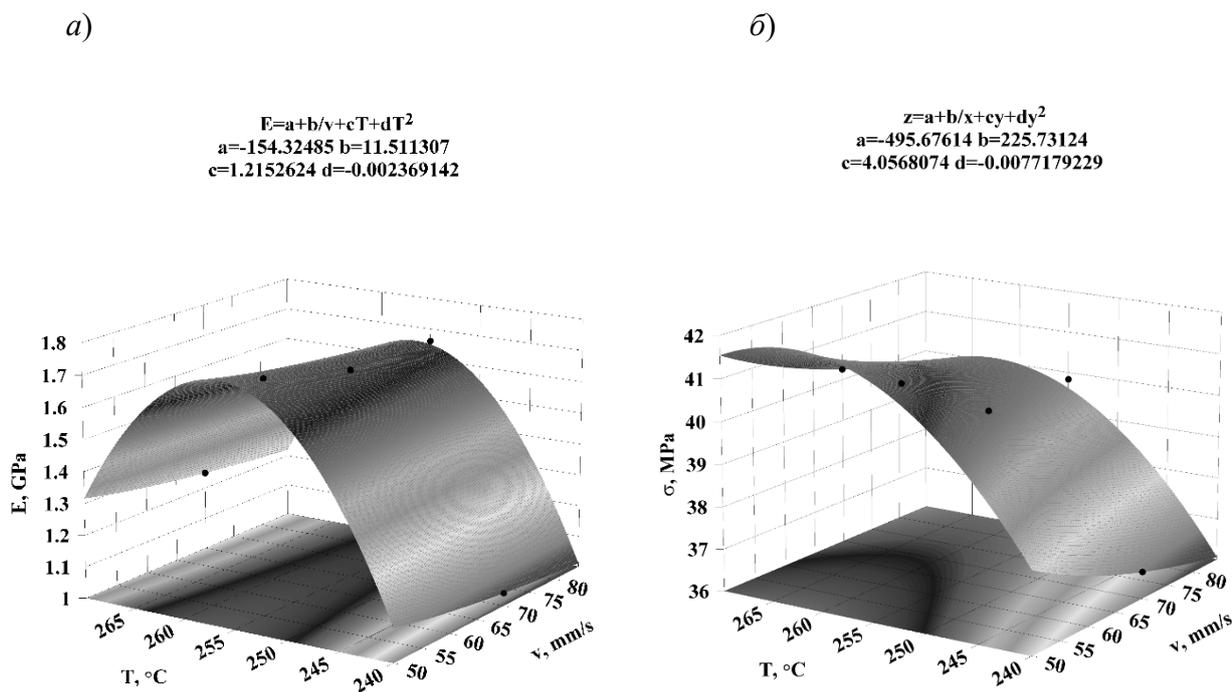


Рис. 2. Зависимость изменения модуля упругости E (a) и предела прочности σ (б) полимерного материала от скорости и температуры FDM-печати при толщине слоя 0,2 мм

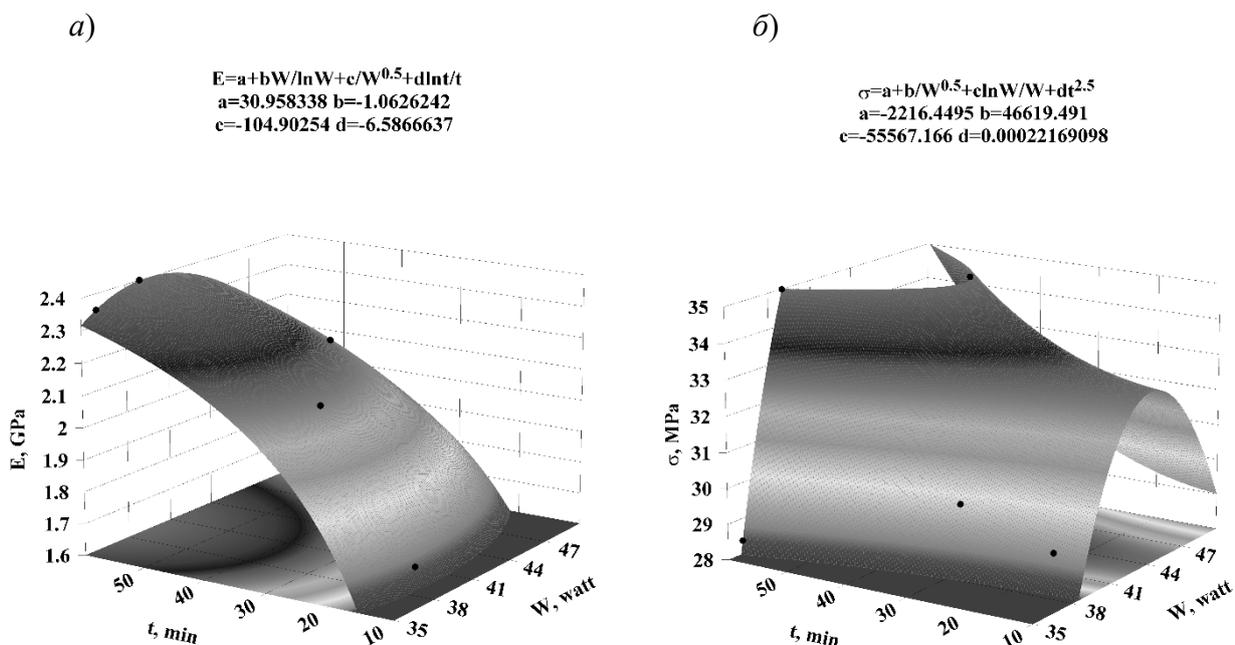


Рис. 3. Зависимость изменения модуля упругости E (a) и предела прочности σ (б) полимерного материала от мощности УФ-излучения и времени выдержки при постобработке изделий, полученных по SLA-технологии

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект № T22M-004 «Развитие метода локального контактного деформирования для неразрушающего контроля полимерных изделий, полученных путем аддитивного синтеза».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 34370–2017. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Ч. 1: Общие принципы. – Введ. 01.12.2018. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 26 с.
2. The mechanical response characteristics of sapphire under dynamic and quasi-static indentation loading / L. Xiaosheng [et al.] // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44, iss.13. – P. 15208–15218.

E-mail: 5657397@gmail.com, 7623300@gmail.com, kravhchn@gmail.com.

УДК 620.179

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ***А. Н. ПРУДНИКОВ***Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDK 620.179

RISK-BASED APPROACH IN ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF MAIN PIPELINES***A. N. PRUDNIKOV***

Аннотация. Рассмотрен риск-ориентированный подход при оценке технического состояния магистральных трубопроводов, использование марковской модели при анализе риска по параметрам напряженно-деформированного трубопровода и результатам неразрушающего контроля.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, марковская модель, трубопровод.

Abstract. The risk-based approach is considered in assessing the technical condition of main pipelines, the use of the markov model in risk analysis based on the parameters of a stress-strain pipeline and the results of non-destructive testing.

Keywords: risk-based approach, markov model, pipeline.

Риск-анализ магистрального нефтепровода. При эксплуатации магистральных нефтепроводов, как и других объектов техносферы, возможны чрезвычайные ситуации с масштабными последствиями. Аварии и катастрофы последних десятилетий свидетельствуют о растущем риске для общества,двигающегося по пути технического прогресса. Поэтому, наряду с развитием техники, растет и проблематика обеспечения безопасности. Принцип «абсолютной безопасности», применяемый до недавнего времени, ставит целью не допустить никакую аварию, создать абсолютно безопасный объект, что априори невозможно и приводит к неготовности к авариям.

В настоящее время подход к возможности аварий существенно изменился и опирается на теорию риска. Теория риска исходит из того, что нельзя сделать объект абсолютно надежным, катастрофа заложена в объект и «только ждёт» своего проявления в виде результата развития событий. Общепринятый риск-ориентированный подход позволяет произвести количественный анализ уровня безопасной эксплуатации техногенного объекта посредством оценки риска возникновения опасных сценариев развития событий.

Наиболее широко используют следующее выражение для оценки риска аварии R :

$$R = PU,$$

где P – вероятность опасного события; U – последствия этого события.

На основании риск-анализа объекта можно определить не только уровень безопасности, но и, используя количественные показатели риска, обеспечить оптимальные режимы функционирования объекта.

Сложность и многогранность процесса возникновения и развития аварийных ситуаций не позволяет построить точные модели и выполнить точный прогноз аварий. Поэтому прогноз техногенных катастроф является вероятностной задачей, достоверность которого определяется адекватностью модели объекта.

Моделирование риска. Изменение технического состояния магистрального нефтепровода происходит под воздействием деградиционных процессов. Данные процессы закономерно рассматривать как совокупность процессов стохастического характера сложной технической системы, которые вызывают переход из одного состояния в другое под воздействием каких-либо причин. То есть любой этап жизненного цикла объекта – это результат развития цепей случайных событий.

При выборе модели математического описания случайных развивающихся процессов изменения параметров объекта технической природы приоритетно выглядит использование марковских моделей [1]. В рамках этого класса моделей объект рассматривается как совокупность возможных состояний и вероятностей перехода между этими состояниями.

Марковские модели нашли применение в вероятностном анализе безопасности сложных технических систем. Марковские модели обладают целым рядом полезных свойств и имеют хорошо развитый математический аппарат. Применительно к прогнозированию технического состояния и оценке риска эксплуатации объектов немаловажным является то, что для марковских моделей будущее состояние (прогноз) зависит лишь от последнего состояния объекта и не зависит от предыстории. Для марковской модели характерно протекание так называемых процессов без последствия, т. е. в модели отсутствуют обратные связи.

Имея в распоряжении размеченный граф состояний (матрицу переходных вероятностей $\|P_{ij}\|$) и начальное состояние системы, не сложно найти вероятность нахождения системы в состоянии k по рекуррентной формуле

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1) \|P_{ij}\| \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, n).$$

Марковский анализ является эффективным, но одновременно сложным и трудоемким методом предсказания надежности и безопасности систем. Для некоторых реальных задач применение марковских методов затруднено вследствие ограничений на размерность соответствующих математических моделей. Вместе с тем, развитие вычислительной техники постепенно решает проблему большой размерности марковских моделей, расчета параметров переходов и получения соответствующих матриц переходных вероятностей или систем уравнений.

При количественном анализе риска аварий на магистральном трубопроводе, являющемся сложным техническим объектом, с использованием марковских моделей удобнее рассматривать нефтепровод в виде иерархической марковской модели. Применять такое моделирование надо не ко всей системе, а к отдельным частям, т. е. провести разбивку, далее моделирование, затем объединение оценок показателей. На начальном уровне составляется марковская модель развития отдельных дефектов (повреждений, несоответствий и т. д.). На следующем этапе происходит объединение отдельных моделей в одну, соответствующую рассматриваемому участку магистрального нефтепровода, и расчет уровня риска масштабных аварий.

В графическом представлении элемент риск-ориентированной марковской модели выглядит следующим образом (рис. 1).

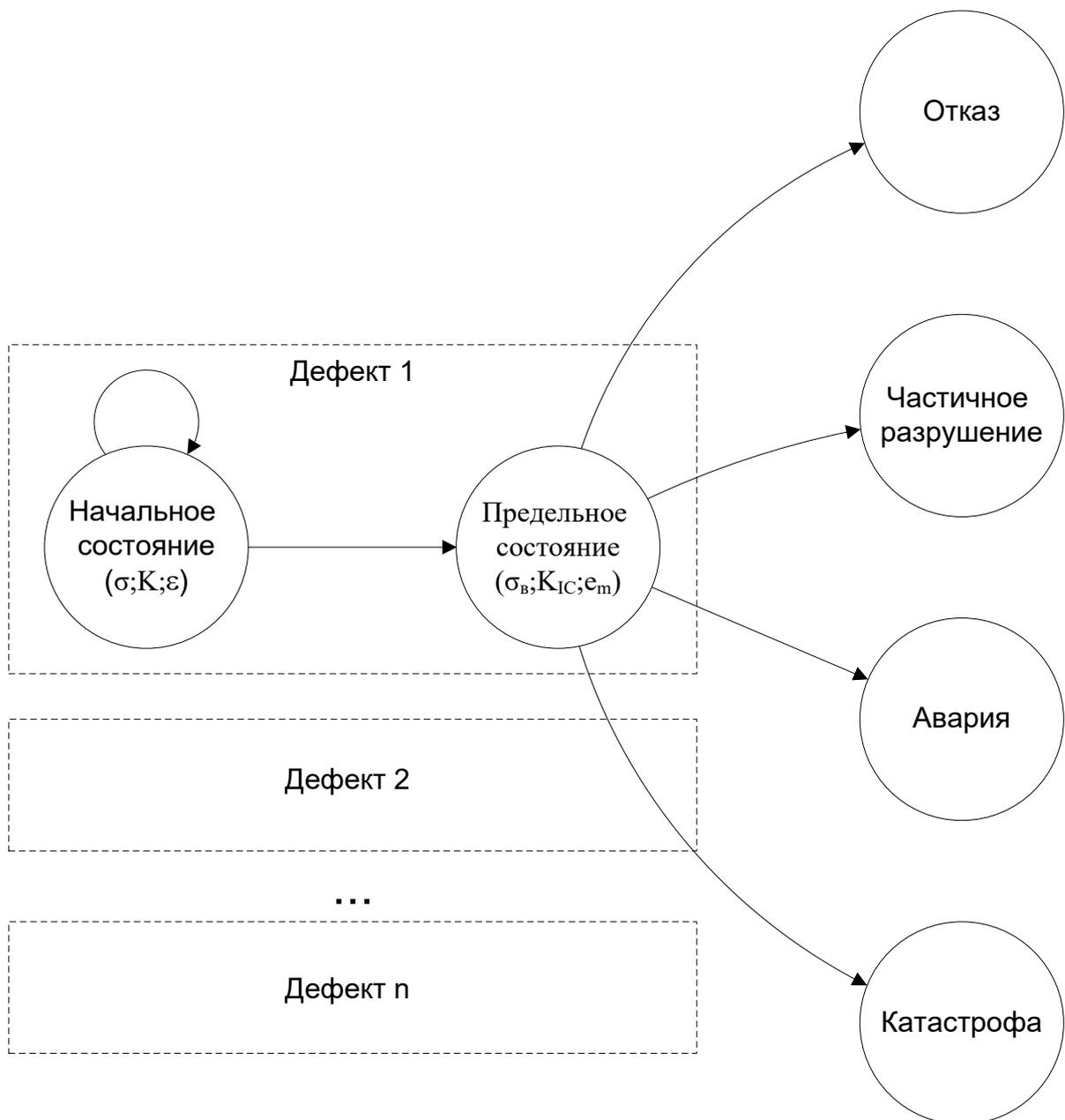


Рис. 1. Фрагмент риск-ориентированной марковской модели

Уровни тяжести последствий отказа по причине определенного сценария развития дефекта устанавливаются по величине риска и имеют условную градацию: отказ, частичное разрушение, авария, катастрофа.

Критерии оценки риска. Технический риск эксплуатации магистрального нефтетрубопровода оценивается вероятностью его разрушения. Если из рассмотрения исключить отказы вследствие природных воздействий, воздействий третьей стороны, нерасчетных перегрузок, ошибок при проектировании, ремонте или эксплуатации, то безопасность эксплуатации нефтетрубопровода определяется сохранением прочности по различным критериям разрушения.

В качестве критерия оценки состояния магистрального нефтетрубопровода можно выбрать характеристику объекта контроля, количественно описывающую механические, физические, геометрические, структурные и другие свойства. Количество критериев оценки состояния ограничивается информацией о трубопроводе и степенью корреляции с физико-механическим состоянием трубопровода или процессами деградации его свойств. Естественно, состояние объекта, определенное по конечному числу критериев, будет тем полнее, чем весомее является данный критерий.

Для нагруженных элементов магистрального нефтетрубопровода в качестве наиболее важных характеристик можно рассматривать напряжения, деформации, размеры и формы дефектов. В свою очередь, эти характеристики зависят от параметров эксплуатации (давление, температура, скорость), от геометрии и пространственного расположения участка, механических свойств применяемой стали.

Опыт эксплуатации магистральных нефтетрубопроводов показывает, что причиной возникновения и развития преобладающего количества аварийных ситуаций является нарушение целостности трубопровода. Разрушение происходит при переходе трубопровода в критическое состояние, вызванное следующими основными факторами:

- образование и рост усталостных и коррозионно-усталостных трещин;
- коррозионные повреждения (наружные, внутренние, стресс-коррозия);
- недопустимые пластические деформации.

Опираясь на статистику разрушений и теоретические исследования механизмов разрушения, можно выделить критерии разрушения магистральных нефтетрубопроводов, которыми являются статическая прочность, усталость, трещиностойкость [2].

При традиционных расчетах статической прочности нефтетрубопровода, не содержащего трещин, по критерию сопротивления вязкому разрушению определяют вероятность появления недопустимых деформаций, выраженную условием

$$\sigma \geq \sigma_T,$$

или вероятность разрушения

$$\sigma \geq \sigma_B,$$

где σ – действующее в элементе номинальное напряжение; σ_T – предел текучести; σ_B – предел прочности.

При эксплуатации магистральных нефтетрубопроводов возможно также образование и развитие трещин. Трещины возникают в локальных зонах, имеющих высокие уровни напряжения, пониженные характеристики механических свойств и концентраторы напряжений (технологические и эксплуатационные дефекты).

Рассмотрим кинетику трещины, воспользовавшись методами механики разрушения. Предельное состояние зоны разрушения, содержащей трещину, представляет собой зависимость между геометрическими размерами дефекта, характеристиками трещиностойкости зоны разрушения и действующими напряжениями.

Условие перехода трещины в нестабильное состояние можно описать уравнением Ирвина

$$K \leq K_{IC},$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений (далее – КИН); K_{IC} – критическое значение КИН.

Расчет КИН реального дефекта трубопровода производится по максимально схожей с ним расчетной схеме, для которой зависимость КИН известна и может быть легко вычислена аналитически [3].

Следует отметить, что для определения прочности трубопровода с трещиной можно применять различные методы анализа стабильности трещин, использующие упругопластическую механику разрушения на основе критического значения коэффициента интенсивности деформаций K_{Iec} , или коэффициента трещиностойкости I_c , или J -интеграла.

В контексте количественной оценки риска разрушения магистрального трубопровода основная задача расчета состоит в определении вероятности достижения объектом предельных значений по рассматриваемым различным критериям разрушения. Вероятностное прогнозирование технических рисков нефтепровода базируется на данных технического диагностирования и НК, механики разрушения. В общем случае алгоритм оценки состояния магистрального нефтепровода по предлагаемой схеме будет включать следующие этапы:

- выявление потенциальных зон разрушения;
- анализ предельных состояний зон разрушения;
- определение вероятности достижения заданных видов предельных состояний;
- оценку риска отказа (разрушения).

Исходной информацией для построения оценочной модели технического состояния трубопровода служат результаты внутритрубной диагностики линейной части, которые представляют общую картину дефектности участка. Дефектоскопическая информация является важной, но не всеобъемлющей при комплексном анализе состояния нефтепровода. Для полноты оценки остаточного ресурса следует учитывать комбинации и влияния параметров эксплуатации.

Объективный учет взаимодействия всех параметров состояния магистрального трубопровода требует комплексного применения различных методов контроля. Так, традиционные методы дефектоскопии, применяемые после шурфования участков трубопровода, позволяют получить информацию об определенных анализируемых параметрах дефектов, а для установления ресурса нефтепровода с заданной поврежденностью необходимо учитывать данные измерения напряженно-деформированного состояния, описывающего локальные и общие напряжения трубопровода в реальных условиях функционирования.

Как отмечалось ранее, рассматривая магистральный нефтепровод в виде марковской модели, состоящей из набора нескольких возможных состояний, классифицируемых в зависимости от уровня риска в диапазоне от полностью безопасного до критического, мерой риска будет являться матрица переходных вероятностей. Переходные вероятности состояний определяются вероятностью нахождения значения рассматриваемого параметра предыдущего состояния в диапазоне значений, описывающих последующее состояние, или вероятностью достижения параметром величины предельного значения состояния, установленном нормативами [4].

В случае, когда параметр имеет нормальное распределение вероятность того, что по результатам представительной выборки измеренных значений среднее значение данного параметра x находится в интервале $[x_{\min}, x_{\max}]$, рассчитывается как

$$P = \Phi\left(\frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma_x}\right) + \Phi\left(\frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma_x}\right),$$

где Φ – нормированная функция Лапласа (интеграл вероятности); \bar{x} – математическое ожидание величины данного параметра по результатам оцениваемой выборки; σ_x – стандартное отклонение величины измеряемого параметра.

Если параметр ограничивается только верхним пределом x_{\max} или нижним пределом x_{\min} , то соответственно

$$P = \Phi\left(\frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma_x}\right) + 0,5;$$

$$P = \Phi\left(\frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma_x}\right) + 0,5.$$

Может иметь место случай, когда параметр имеет нормальное распределение и закон изменения подчиняется линейной зависимости, причем его скорость имеет параметры γ , σ_γ . Тогда вероятность достижения параметром, например, верхней границы x_{\max} через время t , равна

$$P = \Phi \left(\frac{x_{\max} - \bar{x} - \gamma t}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\gamma^2 t^2}} \right) + 0,5.$$

Заключение.

1. Проблема оценки рисков потенциально опасных объектов в настоящее время является достаточно актуальной и ее важность в оценке безопасности только растет. С помощью марковской модели объекта возможно произвести количественный анализ безопасности и определить вероятности отказа системы.

2. Предложено использовать марковскую модель при анализе риска по параметрам напряженно-деформированного трубопровода с учетом реальной поврежденности и эксплуатационной нагруженности. Для расчета переходных вероятностей марковской модели применена нормированная функция Лапласа (интеграл вероятности) по критериям статической прочности, трещиностойкости, усталости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Венгринович, В. Л.** Научный анализ и оценка рисков в системах безопасности / В. Л. Венгринович // Наука и инновации. – 2013. – № 6 (124). – С. 6–9.
2. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т.: пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. – Москва Мир, 1990.
3. **Махутов, Н. А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. Ч. 1: Критерии прочности и ресурса / Н. А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 494 с.
4. Мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса больших сооружений / В. Л. Венгринович [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 42–46.

УДК 534.16

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ***В. И. ПУДОВ, Ю. Н. ДРАГОШАНСКИЙ***

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН

Екатеринбург, Россия

UDC 534.16

RESEARCH OF VOLUME STRUCTURE OF SOFT MAGNETIC MATERIALS BY THE OPTICAL METHOD***V. I. PUDOV, YU. N. DRAGOSHANSKY***

Аннотация. В результате применения разработанной бинокулярной оптической системы исследована магнитная доменная структура одновременно на двух противоположных поверхностях трансформаторной ленты с ребровой (110)[001] и кубической (100)[001] текстурами сплава Fe – 3 % Si. Выявлены формирование многофазной структуры замыкающих доменов и сложная картина перестройки доменов при произвольной ориентации магнитного поля.

Ключевые слова: бинокулярная оптическая система, объемный вид и динамика доменов.

Abstract. As a result of the application of the developed binocular optical system, the magnetic domain structure was studied simultaneously on two opposite surfaces of the transformer tape with ribbed (110)[001] and cubic (100)[001] textures of the Fe-3%Si alloy. The formation of a multiphase structure of closure domains and a complex pattern of domain rearrangement for an arbitrary orientation of the magnetic field are revealed.

Keywords: binocular optical system, volumetric view and domain dynamics.

Уровень физических свойств твердых тел существенно зависит от состояния их кристаллической структуры, наличия в ней различных неоднородностей химического состава, внутренних напряжений, разных включений, шероховатости поверхности. В частности, в ферромагнитных трансформаторных сталях Fe – 3 % Si и сплавах при намагничивании уровень их магнитных характеристик в значительной мере определяется взаимодействием движущихся границ магнитных доменов с этими структурными неоднородностями. Эта связь динамики магнитных доменов с неоднородностями структуры металлов и сплавов служит надежной основой их магнитной структуроскопии [1].

Методы магнитной структуроскопии металлов и сплавов. Среди методов магнитной структуроскопии широко используется оптический мониторинг поверхности твердых тел с использованием различного вида оптических микроскопов. Они позволяют, например, в магнитомягких материалах исследовать динамику магнитной структуры при различных внешних воздействиях (механические деформации, термообработка, намагничивание, облучение) в целях улучшения структуры и свойств материалов. Так как наиболее массовые магнитомягкие сплавы и электротехнические стали (ЭТС) широко используются

в качестве магнитопроводов в виде тонких листов и лент, то наиболее достоверным и информативным может быть исследование их структуры в одних и тех же участках материала на двух противоположных его поверхностях одновременно.

Для этой цели создали устройство [2] на основе двух взаимосвязанных оптических систем, расположенных на общей станине 1 (рис. 1).

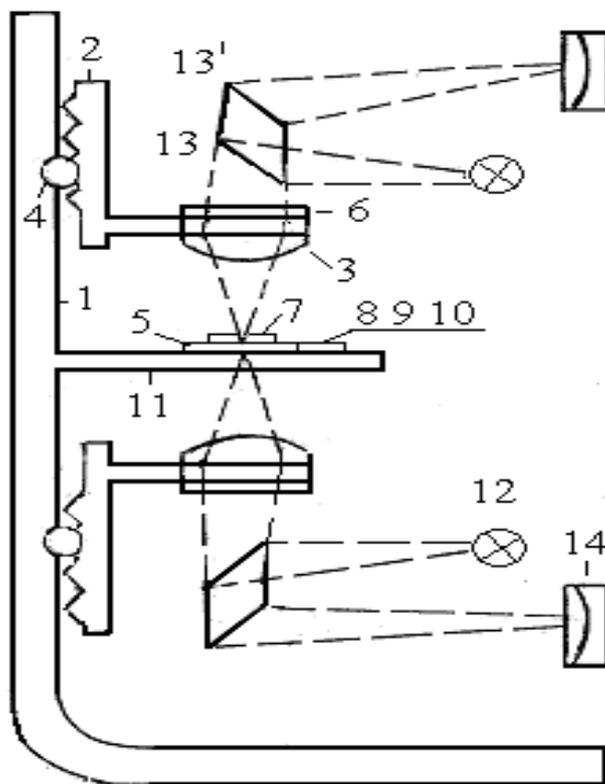


Рис. 1. Схема устройства для оптического мониторинга двух поверхностей ленточного образца трансформаторной стали

Устройство снабжено двумя кольцевыми постоянными магнитами 6, перемещаемыми вдоль объективов 3, а также устройством для растяжения 7 и перемещения исследуемых листовых образцов 8–10 сплавов, располагаемых между объективами. Обе системы состоят из одинаковых оптических элементов – объективов, окуляров 14, источников света 12, светопреломляющих призм 13, 13', зубчато-винтовых механизмов фокусировки 4. Они расположены в вертикальной плоскости параллельно одна относительно другой, причем их объективы установлены соосно и направлены линзами навстречу друг другу.

Новое устройство создает возможность исследования кристаллической и магнитной структур и их изменений одновременно в двух противоположных слоях одного и того же участка металлического образца, а при его малых толщинах (0,30...0,05 мм для ЭТС) позволяет достаточно достоверно прогнозировать вид структуры и внутри образца. Помимо того, становится возможным определять оптимальные режимы обработок, места зарождения основных и замыкающих доменов, распределение и условия сквозного прохождения их границ, физические механизмы изменения параметров доменов

при различных деформационно-текстурирующих воздействиях с улучшением магнитных свойств материала.

В результате мониторинга поверхности лент сплава Fe – 3 % Si установлено, что сквозная магнитная структура из основных полосовых 180° доменов формируется при толщине кристалла порядка ширины этих доменов, для замыкающих доменов – порядка их длины. Обнаружено сложное комплексное $180\text{--}90$ -градусное строение замыкающих доменных структур в объеме кристаллов (рис. 2). Управление их параметрами позволяет снижать магнитные потери при растяжении или локальной лазерной обработке стали и трансформаторных магнитопроводов [3–7].

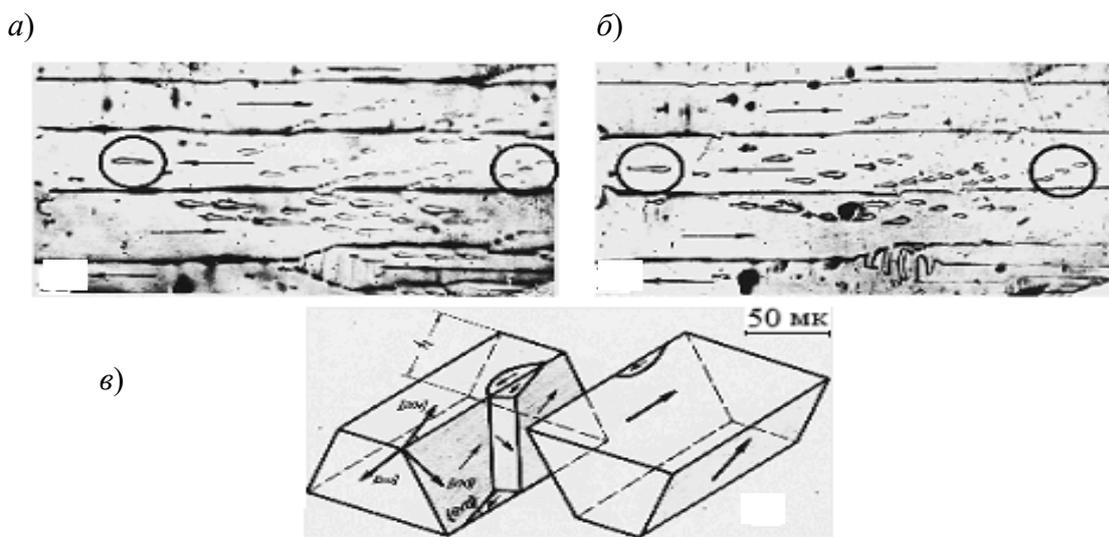


Рис. 2. Вид сквозной магнитной структуры на верхней (а) и нижней (б) поверхностях кристалла стали и объемная схема $180^\circ\text{...}90^\circ$ комплексов замыкающих доменов (в)

Изучение доменной структуры в сплаве Fe – 3 % Si типа $(110)[001]$ одновременно на двух противоположных его поверхностях (рис. 3, а, б) позволило также определить объемный вид доменов в процессе их сложной перестройки при намагничивании под разными углами к оси легкого намагничивания (ОЛН), например, под углом 25° .

В этом случае вначале происходит постепенное вытеснение исходной полосовой структуры 180° доменов 1 типа А системой узких внутриобъемных 90° доменов 2 типа С, намагниченных вдоль двух других ОЛН кристалла – $[010]$ и $[100]$. Магнитный поток доменов 2 новой структуры замыкается вблизи поверхностей кристалла через систему дополнительных трапециевидных доменов 3 (рис. 3, в).

Дальнейшее увеличение поля приводит к росту тех доменов 2 структуры типа С, намагниченность которых ближе к направлению действующего поля H , чем намагниченность в соседних доменах.

Аналогичное объемное строение замыкающей структуры доменов типа С обнаружено и вблизи достаточно крупных локальных дефектов в кристаллах

сплава Fe – 3 % Si, поверхности которых составляют значительные углы с ОЛН (рис. 4).

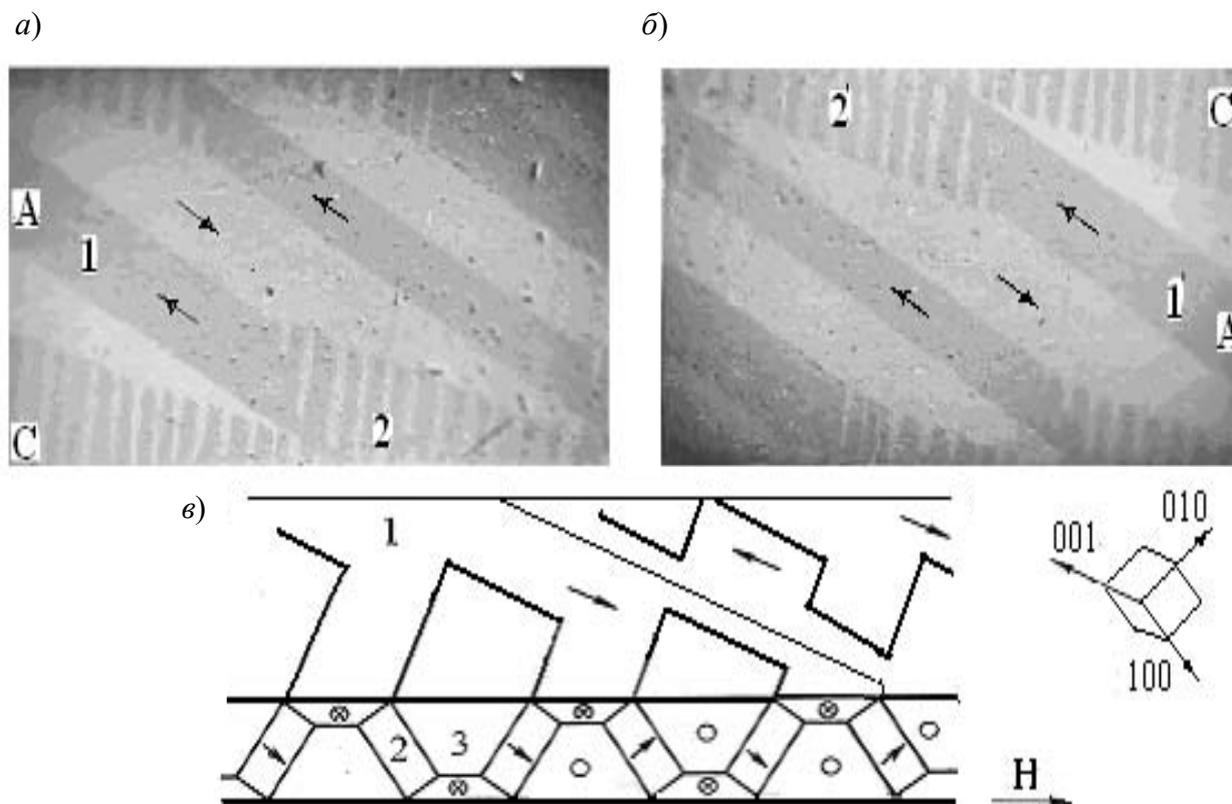


Рис. 3. Вид доменов типа А и С кристалла Fe – 3 % Si при намагничивании; H → направление поля

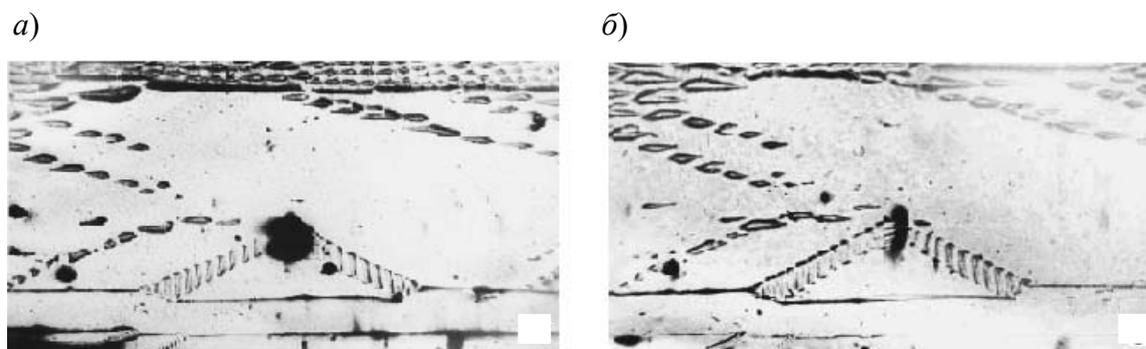


Рис. 4. Вид сквозной замыкающей доменной структуры при сквозном дефекте на верхней (а) и нижней (б) поверхностях кристалла

Наличие 90° доменов в таких замыкающих структурах затрудняет смещение границ доменов при намагничивании и увеличивает линейную магнитострикцию сплава. Нанесение магнитоактивных (растягивающих металл) электроизоляционных покрытий переводит эти домены типа С в менее вредные клиновидные 180° субобласти.

Заключение. Представленное оптико-магнито-механическое устройство существенно повышает уровень и качество исследования кристаллической и

магнитной структур и их изменений, причем одновременно в двух противоположных слоях и в объеме металлического образца. При этом технический результат направлен также на перспективность снижения трудоемкости, повышения информативности исследований, на расширение областей практического использования устройства.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Магнит», № 122021000034-9, и тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горкунов, Э. С.** Влияние структуры сталей на процессы перемангничивания и решение задач магнитной структуроскопии / Э. С. Горкунов, Ю. Н. Драгошанский, С. С. Родионова // Дефектоскопия. – 1998. – № 6. – С. 42–59.
2. Устройство для оптического мониторинга поверхностей твердых тел: пат. RU 174673 / Ю. Н. Драгошанский, В. И. Пудов. – Оpubл. 25.10.2017.
3. Magnetic properties and dynamic domain behavior in grain-oriented 3 % Si – Fe / T. Nozawa [et al.] // IEEE Trans. Magn. – 1996. – Vol. 32, № 2. – P. 572–589.
4. **Dragoshanskii, Yu. N.** Effect of laser treatment stress on the magnetic properties of grain-oriented electrical steel / Yu. N. Dragoshanskii, L. S. Karenina, V. I. Pudov // Актуальные проблемы прочности: материалы 53 Междунар. конф. – Витебск, 2012. – Ч. 1. – С. 231–233.
5. **Драгошанский, Ю. Н.** Улучшение магнитной структуры и свойств магнитомягких сплавов при модификации их поверхности / Ю. Н. Драгошанский, В. И. Пудов // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 3. – С. 48–52.
6. Способ изготовления анизотропной электротехнической стали: пат RU 2569260 / В. И. Пудов, Ю. Н. Драгошанский. – Оpubл. 20.11.2015.
7. **Пудов, В. И.** Доменная структура и магнитные потери шихтованных магнитопроводов при лазерной обработке / В. И. Пудов, Ю. Н. Драгошанский // Физика металлов и металлургия. – 2015. – Т. 116, № 6. – С. 571–576.

E-mail: pudov@imp.uran.ru drago@imp.uran.ru

УДК 624.074.433

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАЗЕМНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

И. О. РАЗОВ

Тюменский индустриальный университет
Тюмень, Россия

UDK 624.074.433

INVESTIGATION OF FREQUENCIES OF FREE OSCILLATIONS OF SURFACE AND UNDERGROUND THIN-WALLED PIPELINES OF LARGE DIAMETER FROM THE POINT OF VIEW OF THE THEORY OF CYLINDRICAL SHELLS

I. O. RAZOV

Аннотация. Производится сравнение и сопоставление частот свободных колебаний, определенных по полубезмоментной теории цилиндрических оболочек среднего изгиба. На основании уравнения движения элемента срединной поверхности цилиндрической оболочки, записанного в усилиях, а затем в перемещениях, получена система уравнений, позволяющая определить частоты свободных колебаний тонкостенного трубопровода при различных значениях волновых чисел m и n , с учетом совместного влияния внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей силы, влияния грунта и различных геометрических характеристик. В конечном решении учтены инерционные составляющие материала оболочки в продольном, окружном и радиальном направлениях. Определены частоты свободных колебаний для наземного и подземного газопровода, исследовано влияние грунта на значения частотных характеристик. Результаты расчетов сведены в таблицы и иллюстрированы в виде графиков на рисунках.

Ключевые слова: газопровод, продольная сила, упругое основание грунта, свободные колебания, резонанс.

Abstract. In this paper, we compare and compare the frequencies of free oscillations determined by the semi-momentum theory of cylindrical shells of average bending. Based on the equation of motion of an element of the middle surface of a cylindrical shell, written in forces, and then in displacements, a system of equations was obtained that makes it possible to determine the frequencies of free vibrations of a thin-walled pipeline for various values of the wave numbers m and n , taking into account the joint influence of the internal working pressure, the parameter of the longitudinal compressive force, ground influence and various geometric characteristics. The final solution takes into account the inertial components of the shell material in the longitudinal, circumferential and radial directions. The frequencies of free oscillations for the ground and underground gas pipelines are determined, the influence of soil on the values of frequency characteristics is studied. The calculation results are summarized in tables and illustrated in the form of graphs in the figures.

Keywords: gas pipeline, longitudinal force, elastic foundation of the soil, free oscillations, resonance.

Сеть магистральных трубопроводов с каждым годом расширяется все больше и больше в виду возросшей потребности в энергоносителях как самой

Российской Федерации, так и стран Европы и Азии. Наряду с увеличением километража трасс трубопроводов, увеличивается и их диаметр в целях повышения эффективности и пропускной способности. В настоящее время применяются трубы диаметром больше 1000 и 1420 мм, а на некоторых участках 1720 мм. Такие трубопроводы следует рассчитывать не по классической стержневой теории, а по теории цилиндрических оболочек. Динамическому расчету в открытой литературе посвящено достаточно большое количество работ [1–13], однако с позиции теории оболочек вопрос колебаний трубопроводов раскрыт недостаточно полно. Такой подход позволяет учесть влияние внутреннего рабочего давления на частоты свободных колебаний, а также деформацию поперечного сечения (эффект кармана).

Запишем решение, полученное для наземного трубопровода (рис. 1) [7], позволяющее исследовать влияние внутреннего рабочего давления, параметра продольной сжимающей силы, геометрических характеристик и влияние упругого основания грунта на частоты свободных колебаний наземного газопровода конечной длины L :

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\tilde{\lambda}_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^*) + k^* m^4 - \tilde{\lambda}_n^4 m^4 P / n^2}{\rho^* R \cdot h(\tilde{\lambda}_n^2 h_{\nu} + m^2 + m^4)}, \quad (1)$$

где P – безразмерный параметр продольной сжимающей силы, $P = \frac{F}{F_9}$;

F_9 – эйлерова сила, $F_9 = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$; E – модуль упругости материала оболочки;

I – осевой момент инерции; $h_{\nu} = \frac{h}{R\sqrt{12(1-\nu^2)}}$; R – радиус срединной

поверхности; $\tilde{\lambda}_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_{\nu}}}$; m – волновое число в окружном направлении;

n – волновое число в продольном направлении; p^* – параметр внутреннего

рабочего давления, $p^* = p \frac{R}{Ehh_{\nu}^2}$; ρ^* – параметр плотности материала оболочки

(трубы), $\rho^* = \rho \frac{R}{Ehh_{\nu}^2}$; k^* – коэффициент, учитывающий влияние грунта на

наземный трубопровод, $k^* = \frac{R^2 k}{\pi Ehh_{\nu}^2} z_m$; z_m – коэффициент, определяемый по [2].

Для исследования значений собственных частот подземного трубопровода (рис. 2) примем решения, приведенные в [6, 7].

Погонная присоединенная масса грунта, вовлекаемая газопроводом при вертикальных упругих колебаниях, определяется выражением

$$\mu_{zpj} = k_{zpj} \mu_{zp},$$

где k_{zpj} – поправочный коэффициент, зависящий от номера тона колебаний; j – номер тона колебаний; μ_{zp} – присоединенная масса грунта на единицу длины трубопровода,

$$\mu_{zp} = \frac{\gamma_{zp} \pi d^2}{4}; \quad (2)$$

γ_{zp} – плотность грунта, окружающего газопровод; d – внешний диаметр газопровода.

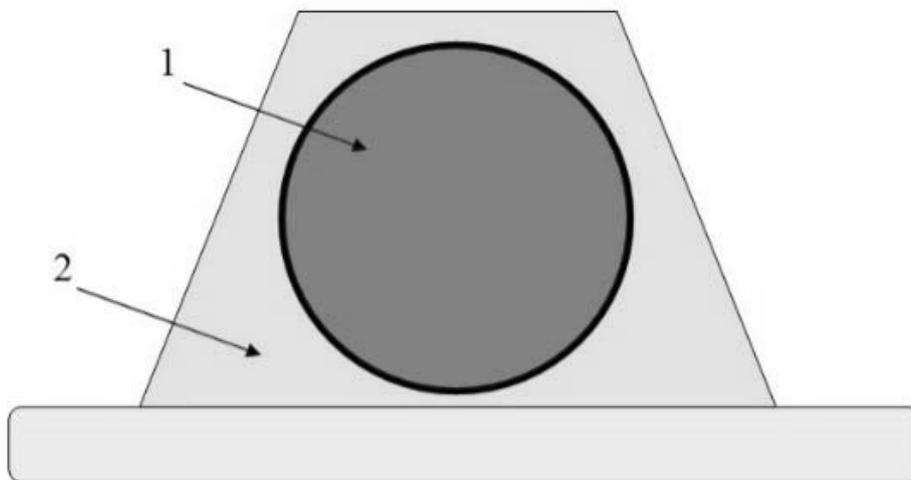


Рис. 1. Наземный трубопровод: 1 – трубопровод; 2 – грунтовая подушка и внешняя обсыпка грунтом

Для исследования частот свободных колебаний трубопроводов примем характеристическое уравнение матрицы A [12, 13]:

$$\begin{vmatrix} d_{11} - \lambda & d_{12} & d_{13} & d_{14} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} - \lambda & d_{23} & d_{24} & \dots & d_{2n} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} - \lambda & d_{34} & \dots & d_{3n} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} - \lambda & \dots & d_{4n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{p-41} & d_{p-31} & d_{p-21} & d_{p-11} & \dots & d_{pn} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } d_{m,m} = \frac{a_{m,m}}{B_{m,n}}; \quad d_{m,m\pm 1} = \frac{a_{m,m\pm 1}}{B_{m,n}}; \quad d_{m,m\pm 2} = \frac{a_{m,m\pm 2}}{B_{m,n}}; \quad \lambda = \omega^2;$$

$$a_{m,m} = A_{m,n} - B_{m,n} \omega_{nm}^2; \quad (4)$$

$$a_{m,m\pm 1} = -\frac{m^5(m\pm 2)}{2} q_{zp}^* \alpha_1; \quad (5)$$

$$a_{m,m\pm 2} = -\frac{m^4[(m\pm 2)^2 - 1]}{2} q_{zp}^* \alpha_2; \quad (6)$$

$$A_{m,n} = \lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{zp}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2; \quad (7)$$

$$B_{m,n} = \rho^* R h (\lambda_m^2 h_v + m^2 + m^4) + \mu_{bj}^* m^4; \quad (8)$$

$$p^* = p_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}; \quad \rho^* = \rho_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}; \quad \kappa^* = \frac{R^2 \kappa}{Eh \cdot h_v^2}; \quad q_{zp}^* = \frac{\gamma HR}{Eh \cdot h_v^2}; \quad \lambda_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_v}};$$

$$\mu_{bj}^* = \mu_{bj} \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}; \quad P = \frac{F}{F_0}.$$

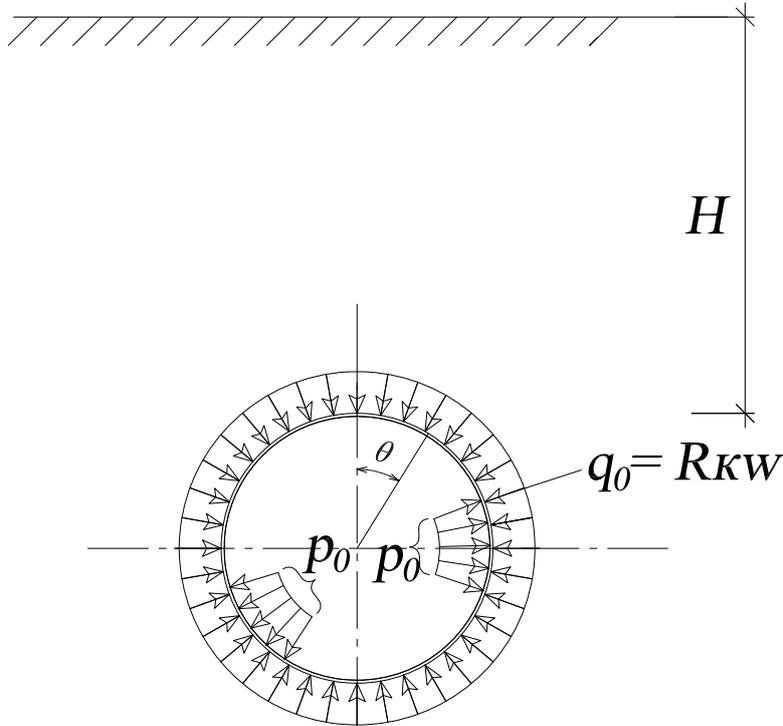


Рис. 2. Радиальный отпор грунта и внутреннее рабочее давление p_0 , действующее на стенку трубы при подземной прокладке глубокого заложения

Рассмотрим однородную изотропную стальную цилиндрическую оболочку, являющуюся участком трубопровода со следующими характеристиками: соотношения толщины стенки h к радиусу $R - 1/50$ (диаметр 1420 мм и толщина стенки 14,2 мм) и параметром длины $L = 10R$. Участок подвержен действию параметра продольной сжимающей силы $P = 0,2$ и внутреннего рабочего давления, изменяющегося в диапазоне от 0 до 7 МПа. Модуль упругости материала стальной трубы $E_{cm} = 2 \cdot 10^5$ МПа. Расчеты выполняются при различных значениях коэффициента постели грунта. Наибольший интерес представляют минимальные частоты, которые реализуются при ω_{21} , что соответствует оболочечной форме колебаний. Рассмотрим не водонасыщенные грунты, в связи с чем демпфером можно пренебречь.

Полученные значения сведены в табл. 1 и 2 и иллюстрированы в виде графиков на рис. 3 и 4.

Табл. 1. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при наземной прокладке

$h/R = 1/50; p_0 = 0 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	3,36	11,32	15,66	23,19	33,51	41,32	47,88
$h/R = 1/50; p_0 = 3 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	48,37	49,56	50,73	53,53	58,74	63,53	67,98
$h/R = 1/50; p_0 = 5 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	62,38	63,31	64,23	66,47	70,73	74,75	78,57

Табл. 2. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при подземной прокладке на глубине 2 м

$h/R = 1/50; p_0 = 0 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	11,68	22,44	29,51	42,30	60,22	73,91	85,44
$h/R = 1/50; p_0 = 3 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	49,65	53,22	56,56	64,17	77,16	88,27	98,12
$h/R = 1/50; p_0 = 5 \text{ МПа}; L/R = 10; P = 0,1$							
$\kappa, 10^7 \text{ Н/м}^3$	0,1	0,3	0,5	1	2	3	4
$\omega_{21}, \text{ Гц}$	63,38	66,21	68,93	75,30	86,64	96,66	105,74

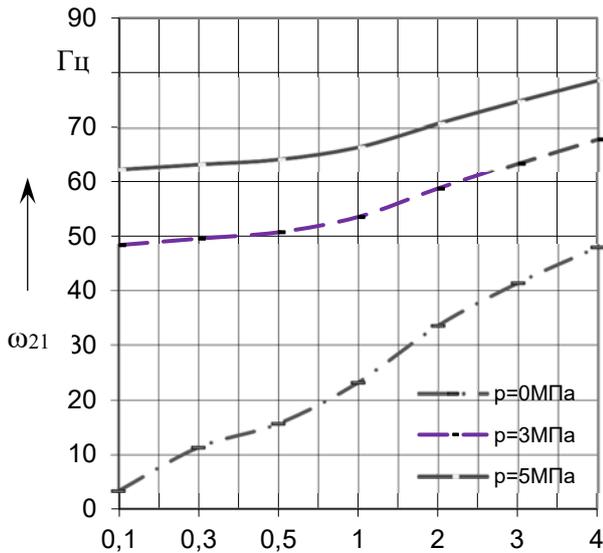


Рис. 3. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при наземной прокладке

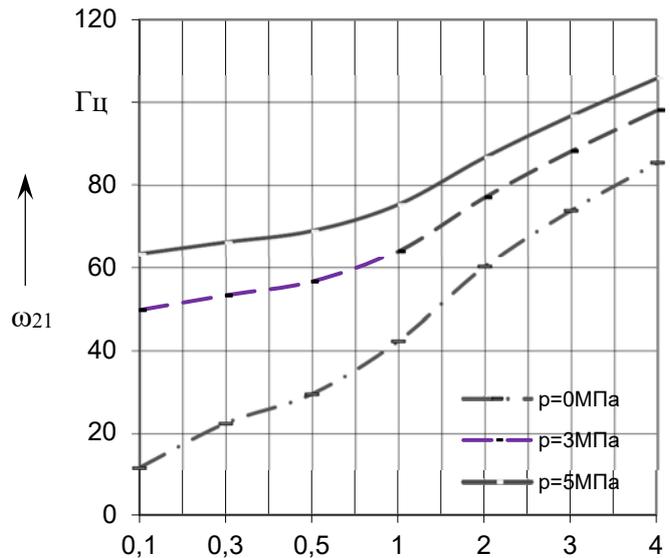


Рис. 4. Зависимость частот свободных колебаний ω_{21} от различных значений внутреннего рабочего давления p_0 и коэффициента постели грунта при подземной прокладке на глубине 2 м

В результате проведенных исследований сделаем следующие **выводы**.

1. Внутреннее рабочее давление увеличивает значения частот свободных колебаний трубопровода, например, при $k = 1 \cdot 10^7$ Н/м³ при $p = 0$ частота $\omega_{21} = 23,19$ Гц, а при $p = 5$ МПа составляет 66,47 Гц, увеличение происходит в 2,86 раз. Это объясняется увеличенной жесткостью самого трубопровода. Для подземного трубопровода увеличение происходит в 1,78 раз. Меньшая тенденция увеличения частот объясняется большим влиянием упругого отпора грунта.

2. В связи с большей площадью взаимодействия трубы с грунтом частоты свободных колебаний для подземного трубопровода увеличиваются с большей тенденцией, например, при $p = 3$ МПа и $k = 0,1 \cdot 10^7$ Н/м³ частота $\omega_{21} = 49,65$ Гц, а при $k = 4 \cdot 10^7$ Н/м³ частота равна 98,12 Гц. Таким образом увеличение составляет почти 50 %, а для наземного при тех же параметрах – 29 %.

Представленные исследования и решения полезны при изучении влияния типов грунтов на частоты свободных колебаний газопроводов при различных вариантах заложения. Дальнейшее исследование механических параметров и воздействий на трубопровод будет проведено в последующих работах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постнов, В. А.** Вибрация корабля / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовец. – Ленинград : Судостроение, 1983. – 248 с.
2. **Аксельрад, Э. Л.** Расчет трубопроводов / Э. Л. Аксельрад, В. П. Ильин. – Ленинград: Машиностроение, 1972. – 240 с.
3. **Болотин, В. В.** Конечные деформации гибких трубопроводов / В. В. Болотин // Тр. Моск. энергет. ин-та. – Москва, 1956. – Вып. XIX. – С. 272–291.
4. **Болотин, В. В.** Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва: Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1956. – 600 с.
5. **Соколов, В. Г.** Свободные колебания наземных газопроводов, обжатых продольной силой, с учетом упругого основания грунта / В. Г. Соколов, И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2013. – № 1 (36). – С. 29–32.
6. **Разов, И. О.** Напряжения и перемещения на контактной поверхности наземного трубопровода большого диаметра / И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2015. – № 3 (50). – С. 105–108.
7. **Разов, И. О.** Исследования свободных колебаний наземных тонкостенных газопроводов большого диаметра / И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2013. – № 4 (39). – С. 100–104.
8. **Соколов, В. Г.** Свободные колебания тонкостенных газопроводов большого диаметра при полуподземной прокладке / В. Г. Соколов, И. О. Разов // Вестн. гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 114–120.
9. **Valiev, M. I.** Intrinsic and parametric oscillations of curved sections of the pipeline with pulsating motion of a weakly compressible fluid / M. I. Valiev, V. V. Zhelobov, E. I. Tarnovskij // Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov. – 2013. – № 2 (10). – P. 48–54.
10. **Il'gamov, M. A.** Forced and parametric fluctuations of the pipeline / M. A. Il'gamov, M. M. Shakir'yanov // Izvestiya Ufimskogo nacional'nogo centra RAN. – 2020. – № 3. – P. 5–11.
11. **Hudayarov, B. A.** Numerical study of pipeline vibrations taking into account the viscoelastic base of the soil / B. A. Hudayarov, F. Z. Turaev // Vestnik NTU «HPI». Ser. Informatika i modelirovanie. – 2017. – № 50 (1271). – P. 66–74.
12. **Dmitriev, A. V.** Dynamic calculation of an underground thin-walled pipeline taking into account the influence of a damper / A. V. Dmitriev, V. G. Sokolov // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2020. – Vol. 12. – P. 2–5.
13. **Sokolov, V. G.** Free vibrations of underground rectilinear thin-walled sections of gas pipelines / V. G. Sokolov, A. V. Dmitriev // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2019. – № 2 (73). – P. 29–34.

E-mail: razovio@mail.ru.

УДК 620.179.14:669.14

ВЫЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 09X17H5Ю ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОКАТКОЙ

М. Б. РИГМАНТ, А. В. КОЧНЕВ, Н. В. КАЗАНЦЕВА, Ю. В. КОРХ, М. К. КОРХ

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН
Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14:669.14

REVEALING OF MAGNETIC ANISOTROPY IN AUSTENITIC STEEL 09KH17N5YU AFTER DEFORMATION BY ROLLING

M. B. RIGMANT, A. V. KOCHNEV, N. V. KAZANTSEVA, YU. V. KORKH, M. K. KORKH

Аннотация. Проведены исследования структуры, фазового состава и магнитной анизотропии в деформированных прокаткой аустенитных образцах стали 09X17H5Ю при образовании в них мартенсита деформации. Показано, что метод магнитного неразрушающего контроля, использующий измерение магнитных полей от локально намагниченных участков, чувствителен к анизотропии магнитной проницаемости. Анизотропия магнитных свойств связана с появлением механической текстуры прокатки. Образование ферромагнитного мартенсита деформации в аустенитной стали 09X17H5Ю подтверждено методом магнитно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: магнитные методы контроля, фазовый состав, аустенитная сталь, мартенсит деформации.

Abstract. The structure, phase composition, and magnetic anisotropy were studied in austenitic samples of 09Kh17N5Yu steel deformed by rolling during the formation of deformation martensite in them. It is shown that the method of magnetic non-destructive testing, which uses the measurement of magnetic fields from locally magnetized areas, is sensitive to the anisotropy of magnetic permeability. The anisotropy of the magnetic properties is associated with the appearance of a mechanical texture of rolling. The formation of ferromagnetic deformation martensite in austenitic steel 09Kh17N5Yu was confirmed by magnetic force microscopy.

Keywords: magnetic testing method, phase composition, austenitic steel, deformation martensite.

Введение. Широкое применение аустенитных сталей обусловлено их коррозионной стойкостью, жаропрочностью, пластичностью. Значительное влияние на технические свойства данных сталей оказывает фазовый состав металла. При эксплуатации изделий из аустенитных сталей под действием деформаций и температуры в структуре аустенитного материала возможно протекание мартенситного превращения. Появление ферромагнитной фазы мартенсита деформации в аустенитной стали может привести к охрупчиванию металла и резкому снижению коррозионных свойств, что обуславливает

необходимость выявления мартенсита деформации на ранних стадиях его зарождения для предотвращения разрушения конструкции.

Так как образование мартенсита деформации (α' -фазы) сопровождается изменением магнитных свойств металла, его наличие можно определять с помощью магнитных методов [1]. В этом направлении представляет большой интерес вопрос возникновения анизотропии магнитных свойств в аустенитных материалах. Наиболее распространенные методы магнитного контроля, использующие намагниченность насыщения, не позволяют проводить исследования анизотропии магнитных свойств ввиду одноосного намагничивания материала до состояния магнитного насыщения.

В [2] при изучении конструкционных сталей (Ст3, 09Г2С, 08Г2Б), подвергнутых прокатке и одноосному растяжению, была обнаружена связь между механической и магнитной анизотропией: изменение тангенциальной и нормальной составляющих полей рассеяния, а также коэрцитивной силы происходило в двух взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к оси деформации. В [3] показано, что деформация холодной прокаткой оказывала влияние на магнитные характеристики аустенитной стали 08Х18Н10Т. Однако подробные структурные и текстурные исследования деформированных образцов из аустенитной стали в [3] не проводили.

Возникновение анизотропии магнитных свойств в аустенитных материалах, обусловленной процессом деформации (текстурой), может свидетельствовать о наличии фазовых переходов с формированием ферромагнитных фаз (мартенсита деформации).

В работе представлены результаты исследований по выявлению анизотропии магнитных свойств, а также ее связи с образованием мартенсита деформации в аустенитной хромоникелевой стали 09Х17Н5Ю методами магнитного неразрушающего контроля и структурного анализа.

Материалы и методы исследований. В качестве материалов для исследований взято три образца прямоугольного сечения из аустенитной стали 09Х17Н5Ю, не содержащей феррит, которые подвергли прокатке при комнатной температуре. Размеры образцов представлены в табл. 1. Деформация рассчитана по изменению толщины образца после прокатки.

Табл. 1. Поперечное сечение исследуемых образцов

Номер образца	Деформация, %	Поперечное сечение, мм
Исходный	0	10,75 × 4,35
1	16	10,90 × 3,65
2	31	11,35 × 3,00
3	55	12,0 × 1,95

Относительная магнитная проницаемость μ была измерена прибором «ФерроКОМПАС» вдоль и поперек направления прокатки. Погрешность измерения прибора согласно сертификату калибровки составляет $\pm 0,003$ (Сертификат калибровки № 002220-285-261 от 24 декабря 2018 г.,

ФГУП «УНИИМ»). Измерение коэрцитивной силы проводилось на экспериментальной установке для исследования магнитоупругого эффекта магнитометрического типа, описанной в [4].

Анализ структуры осуществляли на растровом микроскопе ZEISS CrossBeam AURIGA. Для определения ориентировки отдельных зерен и анализа локальной текстуры использовали приставку EBSD HKL Inca с системой анализа Oxford Instruments Chennal 5. Шаг сканирования – 0,1 мкм. Погрешность определения ориентации кристаллической решетки – не более $\pm 1^\circ$ (в среднем $\pm 0,6^\circ$). Изображения атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии были получены на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены изображения и ориентационные карты исследуемых образцов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. На выделенном участке на рис. 1, *a* видно, что внутри зерен аустенита после прокатки возникает пластинчатая структура, которая может быть связана с ОЦК мартенситом деформации. С увеличением степени деформации (рис. 1, *a, в, д*) происходит сужение зерен и вытягивание их по направлению прокатки (ширина зерен меняется от 30 мкм в образце 1 до 20 мкм в образце 2). Количество зерен с внутренней пластинчатой структурой увеличивается. При этом видно, что пластины образуются в зернах, ориентированных вдоль направления прокатки.

В образце 3 ширина зерна составляет около 10 мкм, причем внутренняя структура зерна фактически не различима (см. рис. 1, *д*).

Дополнительные исследования показали возникновение в образцах многокомпонентной текстуры, включающей ГЦК-текстуру прокатки $\{110\}\langle 111 \rangle$ и текстуру Госсса $\{110\}\langle 001 \rangle$, характерную для деформированных ОЦК-решёток [5].

Результаты магнитно-силовой микроскопии. С помощью магнитно-силовой микроскопии подтверждено образование мартенсита деформации. Изображения получены в бесконтактном режиме с использованием двухпроходной техники, позволяющей визуализировать неоднородность магнитной силы, действующей на зонд со стороны образца. В этом случае исключается влияние рельефа поверхности образцов на результаты магнито-силового сканирования.

На рис. 2 показаны магнитно-силовые изображения деформированных образцов. В исходном состоянии образцы были парамагнитны. В структуре деформированных образцов присутствуют темные крупные зерна парамагнитного аустенита, которые однородны по интенсивности. При этом ферромагнитный мартенсит деформации на магнитно-силовом изображении выглядит, как светлые игольчатые параллельные вытянутые магнитные структуры внутри аустенита. Количество и плотность магнитных структур увеличивается с увеличением деформации (см. рис. 2).

Похожая магнитная доменная структура мартенсита деформации получена с помощью магнитно-силового микроскопа в [6], где показано различие магнитной доменной структуры феррита и образующегося при деформации ОЦК мартенсита в низкоуглеродистых сталях.

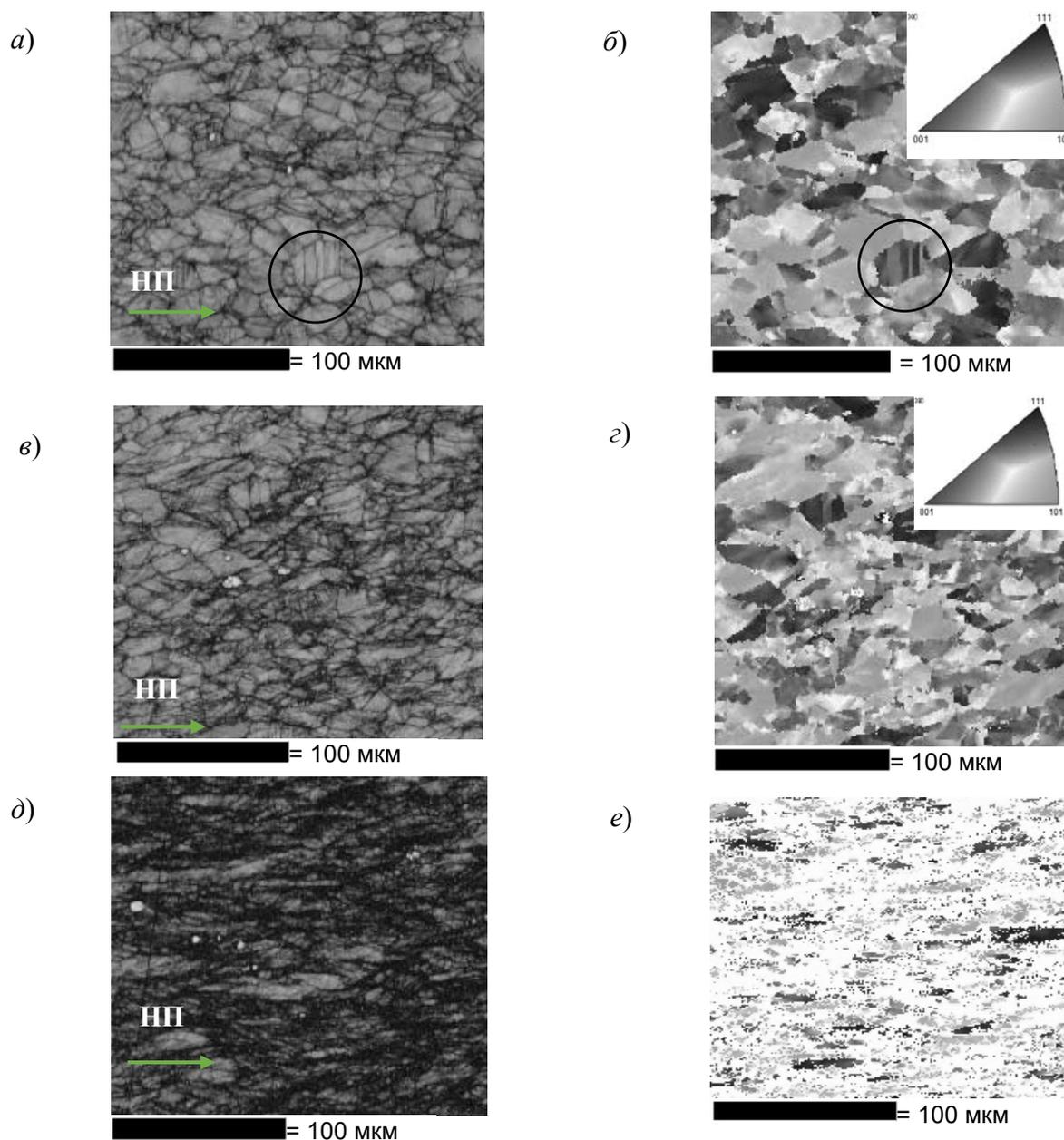


Рис. 1. Изображения сканирующей электронной микроскопии и ориентационные карты, полученные в EBSD-режиме для образца 1 (а, б), образца 2 (в, г), образца 3 (д, е), НП – направление прокатки

Магнитные измерения. В табл. 2 представлены результаты магнитных измерений. Отсутствие ферромагнитных фаз в исходном состоянии было подтверждено как измерениями на установке сильных магнитных полей, так и значением относительной магнитной проницаемости (1,003). Коэрцитивная сила деформированных образцов составляла более 100 А/см, что значительно выше значений, характерных для магнитомягкой фазы феррита (15...16 А/см [7]), а это свидетельствует о фазовом превращении с образованием ферромагнитного мартенсита деформации.

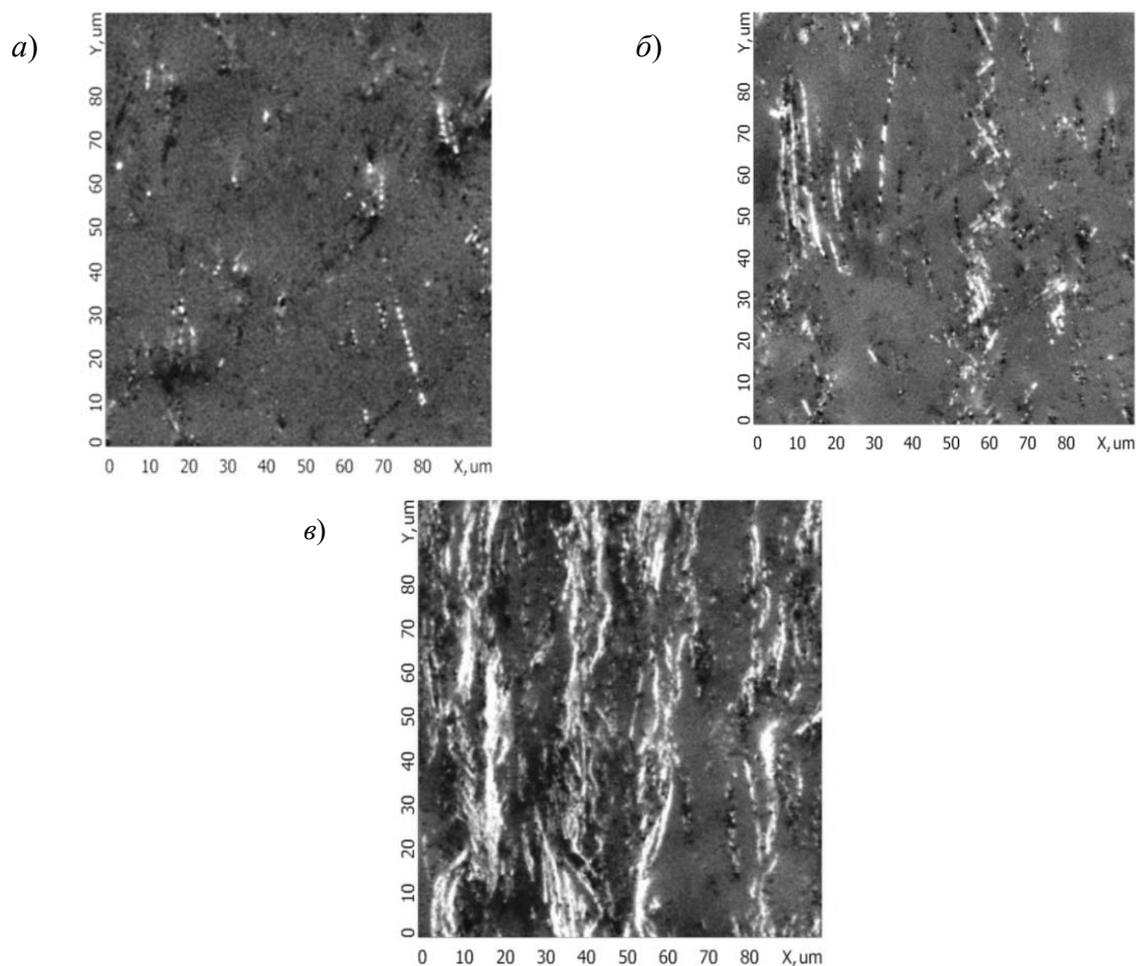


Рис. 2. Магнитно-силовые изображения мартенсита в деформированных образцах: *a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3

Табл. 2. Результаты магнитных измерений исследуемых образцов после деформации прокаткой

Номер образца	Деформация, %	Намагниченность насыщения, кА/м	Содержание мартенсита, %	Относительная магнитная проницаемость μ	
				Перпендикулярно направлению прокатки	По направлению прокатки
1	16	15	1,5	$1,036 \pm 0,003$	$1,045 \pm 0,003$
2	31	42	4	$1,267 \pm 0,003$	$1,283 \pm 0,003$
3	55	88	8	$1,485 \pm 0,003$	$1,530 \pm 0,003$

Различие в значениях относительной магнитной проницаемости наблюдается в зависимости от положения (ориентации) датчика прибора при измерении (см. табл. 2). Это различие существенно превышает погрешность прибора «ФерроКОМПАС», что позволяет говорить о проявлении анизотропии величины μ в образцах аустенитной стали после процедуры прокатки.

Выводы.

1. Выявлена связь между текстурой, изменением фазового состава и магнитной анизотропией в аустенитной стали 09X17H5Ю после деформации прокаткой при комнатной температуре. Причиной возникновения магнитной анизотропии в аустенитной стали с отсутствием феррита в исходном состоянии является формирование мартенсита деформации в благоприятно ориентированных к фазовому переходу ГЦК – ОЦК зернах.

2. Показано, что метод локального анализа магнитных полей прибором «ФерроКОМПАС» в деформированных прокаткой аустенитных образцах при образовании в них мартенсита деформации чувствителен к проявлению анизотропии магнитных свойств. Появление анизотропии относительной магнитной проницаемости может быть использовано для обнаружения мест зарождения и развития дефектов, вызванных образованием мартенсита деформации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корреляционная зависимость различных методов контроля содержания ферритной фазы при сварке (наплавке) аустенитных сталей / П. Е. Меринов [и др.] // Сварочное производство. – 1984. – № 9. – С. 34–36.

2. Влияние типа кристаллографической текстуры на анизотропию параметров магнитных полей рассеяния стального листового проката / Э. С. Горкунов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 54–64.

3. The Application of Magnetic Structural Phase Analysis for the Diagnostics of the State of a 08X18H10T Steel–C 3 Steel Composite Material and Its Components That Were Subjected to Plastic Deformation / E. S. Gorkunov [et al.] // Russian Journal of NDT. – 2012. – Vol. 48, № 6. – P. 343–356.

4. К проблеме контроля магнитного состояния ферромагнитных сталей при воздействии на них магнитных полей и упругих напряжений в зарелевской области / В. Г. Кулеев [и др.] // Дефектоскопия. – 1985. – № 10. – С. 32–42.

5. Выявление магнитной анизотропии в аустенитной хромоникелевой стали после прокатки / М. Б. Ригмант [и др.] // Дефектоскопия. – 2021. – № 12. – С. 56–62.

6. Методы выявления мартенсита деформации в аустенитно-ферритных сталях / М. Б. Ригмант [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 11. – С. 28–42.

7. **Вонсовский, С. В.** Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферромагнетиков / С. В. Вонсовский. – Москва: Наука, 1971. – 1032 с.

E-mail: rigmant@imp.uran.ru.

УДК 620.178.1 : 620.179.14

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ МЕЖДУ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ В МАГНИТНОМ СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.178.1: 620.179.14

USE OF CORRELATIONS BETWEEN PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS IN MAGNETIC STRUCTURAL ANALYSIS

S. G. SANDOMIRSKI

Аннотация. Показано, что механические свойства сталей находятся во взаимосвязях, позволяющих по результатам измерения одного параметра определить остальные. Приведены примеры корреляционного анализа и аналитического описания этих связей для часто используемых в машиностроении сталей. Сообщается о новом подходе, позволяющем расширить возможности неразрушающего магнитного контроля физико-механических свойств сталей. Предложено информационные параметры магнитной структуроскопии формировать из результатов измерения их коэрцитивной силы и отношения остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Приведен пример эффективного использования такого параметра. Область применения результата – неразрушающий контроль физико-механических свойств изделий.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, среднеуглеродистые стали, механические свойства, временное сопротивление, твердость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, магнитный структурный анализ.

Abstract. It is shown that the mechanical properties of steels are in correlation, allowing the results of measurement of one parameter to determine the others. Examples of correlation analysis and analytical description of these relationships are given for steels frequently used in mechanical engineering. A new approach is reported which expands the possibilities of nondestructive magnetic control of physical and mechanical properties of steels: it is suggested to form information parameters of magnetic structuroscopy from results of measurements of their coercive force and ratio of residual magnetization to magnetization of technical saturation. An example of effective use of such parameter is given. Field of application of the result is non-destructive control of physical and mechanical properties of articles.

Keywords: non-destructive testing, medium-carbon alloyed steels, mechanical properties, tensile strength, hardness, coercive force, remanent magnetization, magnetic structural analysis.

Все механические свойства (временное сопротивление σ_0 , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ и сужение ψ , твердости HRC и HB по шкалам Роквелла и Бринелля) важны для расчета эксплуатационных параметров стальных изделий. Но в литературе для многих сталей приведен не весь комплекс характеристик. Поэтому важно установить взаимосвязи между механическими свойствами и твердостью сталей заданного класса.

Цель работы – обобщение исследований по аналитическому описанию взаимосвязей механических свойств часто используемых в машиностроении

сталей. Расширение на этой основе возможностей их неразрушающего магнитного контроля.

В [1] показано, что контроль комплекса механических параметров стали по результату измерения их магнитных свойств возможен, если между физико-механическими свойствами имеются тесные корреляционные связи.

Для определения связей между механическими свойствами качественных конструкционных углеродистых сталей воспользуемся данными, приведенными в [2, табл. 7], в которой механические свойства этих сталей приведены в зависимости от содержания в них углерода.

На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости $\sigma_{0,2}$, δ и ψ сталей 08, 10кп, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 и 70 от их σ_s .

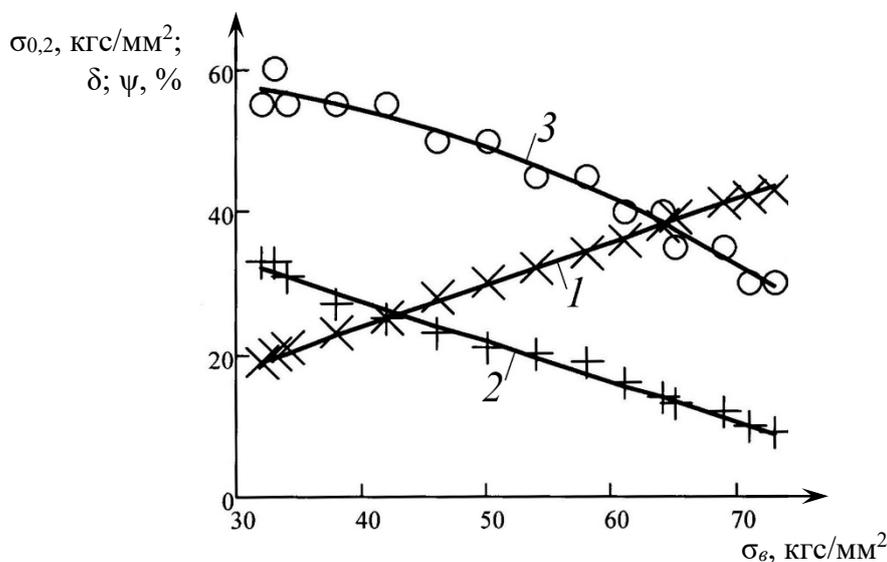


Рис. 1. Зависимости $\sigma_{0,2}$ (x), δ (+) и ψ (o) качественных углеродистых сталей от их σ_s . (1–3) – линии их тренда соответственно

Статистическая обработка зависимостей (см. рис. 1) позволила получить следующие линии тренда (τ – размерный множитель, $\tau = 1 \text{ мм}^2/\text{кгс}$):

$$\sigma_{0,2} \approx 0,595\sigma_s; \quad (1)$$

$$\delta \approx 50 - 0,564\tau\sigma_s; \quad (2)$$

$$\psi \approx 55 + 0,39\tau\sigma_s - 0,01015 (\tau\sigma_s)^2. \quad (3)$$

Достоверность аппроксимации R^2 (квадрат коэффициента R корреляции) табличных [2, табл. 7] данных составила для линий тренда (1–3) 0,998; 0,982; 0,97 соответственно.

Полученный результат позволяет практически точно прогнозировать величину механических характеристик качественных углеродистых сталей по результату измерения одной из них. Например, σ_s стали 20кп после хими-

ко-термической обработки составляет 490 МПа, $\sigma_{0,2} = 295$ МПа [3]. Рассчитанное по формуле (1) значение $\sigma_{0,2} \approx 293$ отличается от справочного менее, чем на 1 %.

Для второго примера на рис. 2 приведены зависимости, выполненные по формулам [3, 4] механических свойств и твердости, широко используемой в промышленности стали 40X и ее основных магнитных параметров от температуры T_o отпуска.

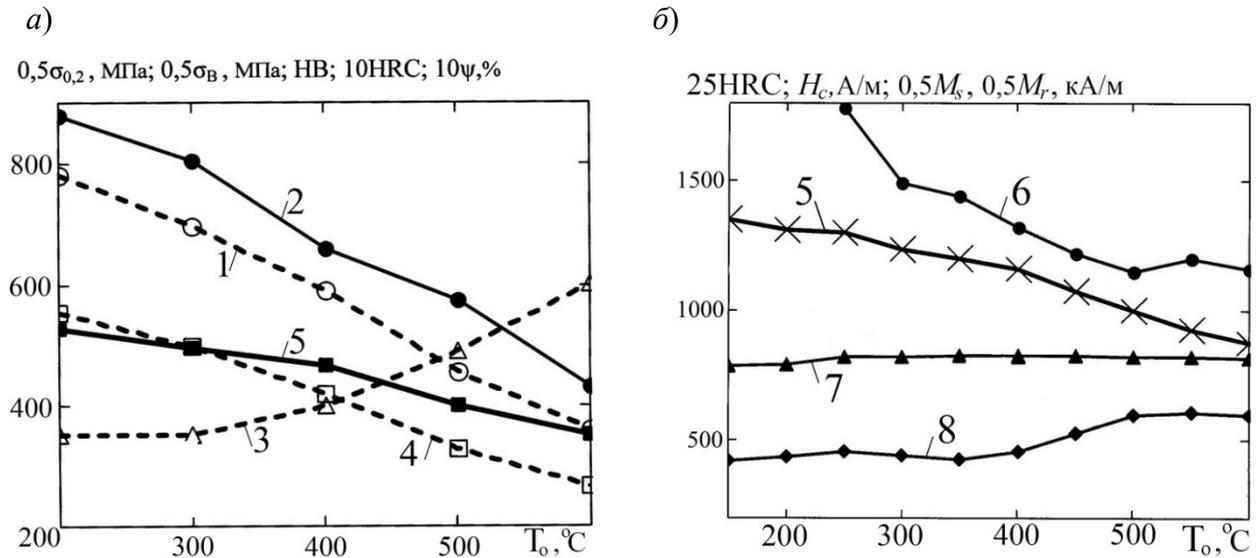


Рис. 2. Зависимость механических (а) и магнитных (б) свойств (1 – $\sigma_{0,2}$; 2 – σ_b ; 3 – ψ ; 4 – твердость HB; 5 – твердость HRC; 6 – коэрцитивная сила H_c ; 7 – намагниченность M_s технического насыщения; 8 – остаточная намагниченность M_r) стали 40X от температуры T_o отпуска после закалки

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, а, показал, что все механические свойства и твердость стали 40X с увеличением T_o изменяются монотонно. Это свидетельствует о наличии тесных корреляционных связей между механическими свойствами и твердостью стали 40X [5]. В подтверждение этого в табл. 1 приведены уравнения регрессии для расчета σ_b , $\sigma_{0,2}$, ψ , HRC и HB стали 40X по любому из этих параметров для всех возможных их комбинаций. В таблице также приведены квадраты коэффициентов R корреляции (достоверности аппроксимаций R^2) и значения $\bar{\delta}$ модулей относительного отклонения результатов расчета параметров $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ , HB и HRC от их значений, представленных на рис. 2.

Высокие значения R^2 ($0,91 \leq R^2 \leq 0,999$), приведенных в таблице линейных уравнений регрессии, и малые $\bar{\delta}$ ($0,75 \% \leq \bar{\delta} \leq 6,39 \%$) (близкие по величине к погрешностям измерения механических свойств) показали, что результаты измерения каждого из физико-механических свойств могут быть использованы для определения (по крайней мере, весьма точной оценки) остальных физико-механических свойств стали 40X.

Следовательно, для неразрушающего контроля механических свойств стали 40X достаточно разработать достоверный метод контроля ее твердости. Но магнитные свойства стали 40X в практически важном интервале температур

отпуска изменяются немонотонно, незначительно (см. рис. 2, б), или не могут быть измерены точно. В рамках разработанного подхода [6] для решения поставленной задачи эффективно использован параметр

$$H_{c1} = H_c(1 - K_{II})^2, \quad (4)$$

где $K_{II} = M_r/M_s$,

обеспечивший коэффициент корреляции $R = 0,977$ и среднее квадратичное отклонение $\bar{\sigma} \approx 1$ ед. HRC между результатами неразрушающего определения и измерения твердости HRC стали 40X в практически важном интервале ее изменения.

Табл. 1. Линейные уравнения регрессии корреляционных взаимосвязей между физико-механическими свойствами стали 40X

x	HRC	HB	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_6 , МПа	ψ , %
HRC	x	$0,0597x + 20,1$ $R^2 = 0,9817$	$0,0207x + 20,9$ $R^2 = 0,9873$	$0,0195x + 18,5$ $R^2 = 0,9692$	$-0,653x + 73,5$ $R^2 = 0,9604$
HB	$16,45x - 323,6$ $\bar{\delta} = 1,74 \%$	x	$0,346x + 13,6$ $R^2 = 0,9992$	$0,327x + 26,64$ $R^2 = 0,9885$	$-10,54x + 873,3$ $R^2 = 0,9100$
$\sigma_{0,2}$, МПа	$47,73x - 981,4$ $\bar{\delta} = 2,81 \%$	$2,892x - 38,5$ $\bar{\delta} = 0,75 \%$	x	$0,946x + 115,8$ $R^2 = 0,9851$	$-30,62x + 2493$ $R^2 = 0,9170$
σ_6 , МПа	$49,6x - 877,4$ $\bar{\delta} = 3,22 \%$	$3,013x + 99,7$ $\bar{\delta} = 2,78 \%$	$1,041x + 140,5$ $\bar{\delta} = 3,17 \%$	x	$-32,17x + 2749$ $R^2 = 0,9199$
ψ , %	$-1,472x + 109,6$ $\bar{\delta} = 4,49 \%$	$-0,0863x + 79,3$ $\bar{\delta} = 6,39 \%$	$-0,0229x + 78,3$ $\bar{\delta} = 7,32 \%$	$-0,0286x + 82,1$ $\bar{\delta} = 5,23 \%$	x

Для расчета твердости HRC стали 40X по результату измерения ее параметра H_{c1} в [1] рекомендована аналитическая зависимость

$$\text{HRC} \approx 37,144 + (0,46\tau H_{c1} - 35,5)^{0,5}, \quad (5)$$

где τ – размерный множитель, $\tau = 1$ м/А.

Формула (5) позволяет оценить величину HRC стали 40X по ее H_{c1} .

Используем уравнение (5) и уравнения из таблицы зависимостей $\sigma_{0,2}$, σ_6 и ψ от твердости HRC стали 40X для построения зависимостей $\sigma_{0,2}$, σ_6 и ψ стали 40X от параметра H_{c1} . Проведя алгебраические преобразования, получим:

$$\sigma_{0,2} \approx 791,5 + 32,373(\tau H_{c1} - 77,17)^{0,5}; \quad (6)$$

$$\sigma_6 \approx 965 + 33,64(\tau H_{c1} - 76,74)^{0,5}; \quad (7)$$

$$\psi \approx 54,9 - (\tau H_{c1} - 77)^{0,5}. \quad (8)$$

На рис. 3 зависимости $\sigma_{0,2}(T_o)$, $\sigma_b(T_o)$ и $\psi(T_o)$ для стали 40X, рассчитанные по формулам (6)–(8) на основании результатов [6], измерения магнитных параметров стали 40X сопоставлены с экспериментальными результатами измерения зависимостей $\sigma_{0,2}(T_o)$, $\sigma_b(T_o)$, $\psi(T_o)$ стали 40X, приведенными на рис. 2, а.

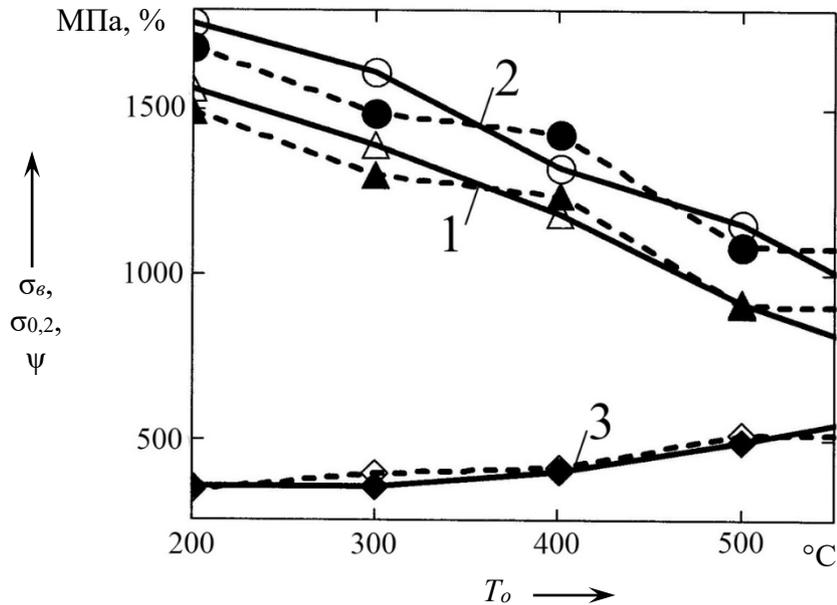


Рис. 3. Зависимость механических свойств (1 – $\sigma_{0,2}$; 2 – σ_b ; 3 – ψ) стали 40X от температуры T_o отпуска после закалки: сплошные кривые – результаты измерения в [3]; пунктирные – расчет соответственно по формулам (6)–(8)

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей показывает, что результаты расчета механических свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ) стали 40X по разработанным формулам (6)–(8) хорошо описывают результаты измерения этих параметров на образцах, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур $200\text{ °C} \leq T_o \leq 550\text{ °C}$. Об этом свидетельствуют и высокие коэффициенты R корреляции между результатами расчета $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ по формулам (6)–(8) и их экспериментального измерения в [3], составившие для образцов стали 40X, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур $200\text{ °C} \leq T_o \leq 500\text{ °C}$, соответственно 0,977; 0,934 и 0,957.

Выводы. Механические свойства (временное сопротивление σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное сужение ψ и твердости HRC и HB углеродистых сталей и стали 40X монотонно изменяются при изменении температуры T_o отпуска после закалки и находятся в тесных корреляционных связях друг с другом. Разработанные уравнения линейной регрессии, описывающие эти взаимосвязи, приведены в соотношениях (1)–(3) и в табл. 1. Высокая достоверность аппроксимации этими уравнениями реально существующих связей между проанализированными параметрами и небольшие погрешности расчета по ним позволяют по результату измерения одного из физико-механических параметров стали оценить величину остальных.

Построены корреляционные зависимости твердости HRC и механических свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_s и ψ) стали 40X от магнитного параметра H_{c1} (4), сформированного по результатам измерения коэрцитивной силы H_c и отношения K_{II} остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Получены высокие коэффициенты R корреляции между результатами экспериментального измерения HRC, $\sigma_{0,2}$, σ_s , ψ и их расчета по разработанным формулам, составившие для образцов стали 40X, подвергнутых после закалки отпуску в интервале температур $200\text{ }^\circ\text{C} \leq T_o \leq 500\text{ }^\circ\text{C}$. Это позволяет использовать разработанные формулы для неразрушающего магнитного контроля механических свойств стали 40X в практически важном диапазоне их изменения по результатам измерения магнитных параметров предельной петли гистерезиса стали 40X, сгруппированных в соответствии с алгоритмом H_{c1} . По результатам измерения H_c и K_{II} стали 40X с использованием формул (5)–(8) и формул, сведенных в табл. 1, можно оценить ее твердость HRC и $\sigma_{0,2}$, σ_s , ψ .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сандомирский, С. Г.** Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов / С. Г. Сандомирский. – Минск: Беларуская навука, 2021. – 144 с.
2. **Агамиров, Л. В.** Машиностроение / Л. В. Агамиров // Энциклопедия: в 40 т. Разд. 2: Материалы в машиностроении. Т. 2–1: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. – Москва: Машиностроение, 2010. – 851 с.
3. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.] ; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 640 с.
4. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2005. – 218 с.
5. **Сандомирский, С. Г.** Корреляционные зависимости между механическими свойствами и магнитным параметром стали 40X / С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 43–50.
6. **Клюев, В. В.** Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – Москва: Спектр, 2017. – 248 с.

E-mail: sand_work@mail.ru.

УДК 620.179.14

РАСЧЕТ НАМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА: КРИВАЯ СТОЛЕТОВА***С. Г. САНДОМИРСКИЙ***Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

CALCULATION OF MAGNETIZATION OF STEELS ACCORDING TO THE PARAMETERS OF THE HYSTERESIS LOOP LIMIT: STOLETOV CURVE***S. G. SANDOMIRSKI***

Аннотация. Показано, что кривая Столетова стали (зависимость магнитной восприимчивости χ от напряженности магнитного поля H в материале) может быть с достаточной для практики точностью рассчитана по ее коэрцитивной силе H_c , намагниченности M_s технического насыщения и остаточной намагниченности M_r . Разработанная формула обоснована статистическим анализом сопоставления результатов расчета и эксперимента для стали ШХ15 в состоянии поставки и закаленной. Результат позволяет отказаться от трудоемких измерений кривых Столетова сталей. Разработанная формула позволяет построить зависимость $\chi(H)$ и проанализировать ее в разных диапазонах изменения H для любых сталей, результаты измерения H_c , M_s и M_r которых приведены в справочной литературе.

Ключевые слова: ферромагнитные стали, основная кривая намагничивания, кривая Столетова, петля магнитного гистерезиса, намагниченность технического насыщения, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила.

Abstract. It is shown that the Stoletov curve of steel (the dependence of the magnetic susceptibility χ on the magnetic field strength H in the material) can be calculated with sufficient accuracy for practice by its coercive force H_c , magnetization M_s technical saturation and residual magnetization M_r . The developed formula is justified by statistical analysis of comparison of calculation results and experiment for steel SHC15 (100Cr6, 52100) in the delivery state and hardened. The result allows to refuse from labor-intensive measurements of Stoletov curves of steels. The developed formula makes it possible to construct the dependence $\chi(H)$ and to analyse it in different ranges of H variation for any steels, the results of H_c , M_s and M_r measurements of which are given in the reference literature.

Keywords: ferromagnetic steels, basic magnetization curve, Stoletov curve, magnetic hysteresis loop, technical saturation magnetization, residual magnetization, coercive force.

Намагничивание ферромагнитных сталей, определяющее их работу в электротехнических устройствах, характеризуют основная кривая намагничивания $M(H)$ (геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получают при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля) и кривая Столетова (график $\chi(H)$ зависимости магнитной восприимчивости χ от напряженности магнитного поля H в ферромагнетике) (рис. 1).

Основными магнитными свойствами материалов, результаты измерения которых приведены в справочной литературе практически для всех сталей,

являются коэрцитивная сила H_c , намагниченность M_s технического насыщения и остаточная намагниченность M_r .

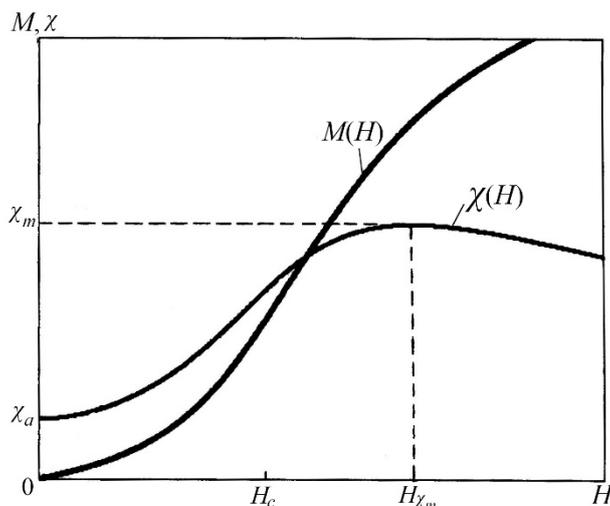


Рис. 1. Основная кривая намагничивания $M(H)$ и кривая Столетова $\chi(H)$ стали

При соблюдении требований [1] относительная погрешность δ измерения H_c магнитомягких ($H_c \leq 4$ кА/м) ферромагнитных материалов не превышает $\pm 2\%$, M_s и M_r — $\pm 3\%$, а δ измерения отношения $K_{II} = M_r/M_s$ при измерении M_s и M_r на одной и той же аппаратуре не превышает $\pm 1\%$ [2]. Результаты измерения H_c , M_s и M_r практически всех известных материалов приведены в научной и справочной литературе, например [3–5]. Погрешность δ измерения значений χ на кривой Столетова по методике, регламентированной [1], составляет $\pm 6\%$ [2]. Измерения основных кривых намагничивания и кривых Столетова сталей немногочисленны [3, 4]. Это осложняет выбор оптимальных материалов сердечников измерительных зондов и преобразователей и режимов их изготовления.

Как показано в [6], для аналитического описания изменения намагниченности M на основной кривой намагничивания и кривой Столетова сталей известные исследования предлагают провести измерения параметров, которые отсутствуют в справочной литературе.

Связь намагниченности M на основной кривой намагничивания магнитного материала с параметрами его H_c , M_s и M_r установлена в [7]. Актуальными для решения электротехнических задач являются аналитическое описание изменения магнитной восприимчивости χ на кривой Столетова сталей по результатам измерения только параметров их предельной петли магнитного гистерезиса и его обоснование.

В работе сообщается о разработке аналитического выражения для описания изменения магнитной восприимчивости χ сталей на кривой Столетова по напряженности H намагничивающего поля, коэрцитивной силе H_c , намагниченности M_s технического насыщения и остаточной намагниченности M_r сталей, измеренных на предельной петле гистерезиса.

Разработка формулы для расчета магнитной восприимчивости χ на кривой Столетова сталей. Не существует точной формы записи функции $\chi(H)$

с учетом формирования, роста и ориентации магнитных доменов. Поэтому в расчетах магнитного состояния сталей используют интерполирующие зависимости. Эксперименты [8] показали, что зависимость $\chi(H)$ конструкционных сталей наиболее точно описывает формула, имеющая следующую компактную запись:

$$\chi = \frac{\chi_a}{1+h^2} + \frac{M_s h}{\pi(h^2+k)} \sum_{n=0}^1 (-1)^n \operatorname{arctg}[T(1+(-1)^n h)], \quad (1)$$

где $h = H/H_c$; $T = \operatorname{tg}(\pi K_{II}/2)$; $K_{II} = M_r/M_s$; $k = \frac{M_s \operatorname{arctg}(2T)}{\pi(M_C - \chi_a H_c / 2)}$; χ_a – начальная магнитная восприимчивость; M_C – намагниченность по основной кривой намагничивания при $H = H_c$.

Непосредственное применение (1) для расчета χ невозможно из-за использования в (1) параметра M_C , отсутствующего в справочниках по магнитным свойствам сталей. Результаты исследований влияния режимов получения сталей на их χ_a не всегда достоверны и приводятся в литературе реже, чем на H_c , M_r и M_s .

Величины χ_a и M_C удалось выразить через M_r , H_c и M_s [9]. Для этого использованы связи между магнитными параметрами сталей. Анализ измерений H_c , M_r и максимальной магнитной проницаемости μ_m 855 разных сталей показал, что наилучшую точность расчета μ_m обеспечивает формула

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

где $\tau = 1$ м/кА.

Средняя относительная погрешность $\bar{\delta}$ расчета μ_m сталей по (2) менее 10 %. Это меньше суммы погрешностей δ измерений по стандартным методикам [1] входящих в (2) параметров.

С учетом (2) в [9] установлена достоверная связь μ_a с M_r и H_c сталей:

$$\mu_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75\tau H_c}) H_c}. \quad (3)$$

Результаты статистического анализа связи достоверных результатов измерения μ_a с результатами расчета μ_a по (3) показали, что формула (3) пригодна для расчета μ_a сталей по H_c и M_r . Значение $\bar{\delta} \approx 10,7$ % при расчете μ_a по (3) меньше суммы погрешностей измерения по стандартным методикам [1] входящих в (3) параметров.

С учетом (2) и (3) в расчетах кривой Столетова сталей совместно с формулой (1) следует использовать формулы

$$M_c \approx 0,67[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2]M_r \quad (4)$$

и

$$\chi_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2]M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75\tau H_c})H_c} - 1. \quad (5)$$

Для обоснования правомерности использования формул (1), (4), (5) для расчета зависимости $\chi(H)$ на рис. 2 результаты расчета по ним сопоставлены с результатами экспериментального измерения значений χ при разных H в [8, рис. 7, 8]. Для сопоставления расчета и эксперимента использована сталь ШХ15 в состоянии поставки и закаленная, магнитные параметры по [8] которых приведены в табл. 1.

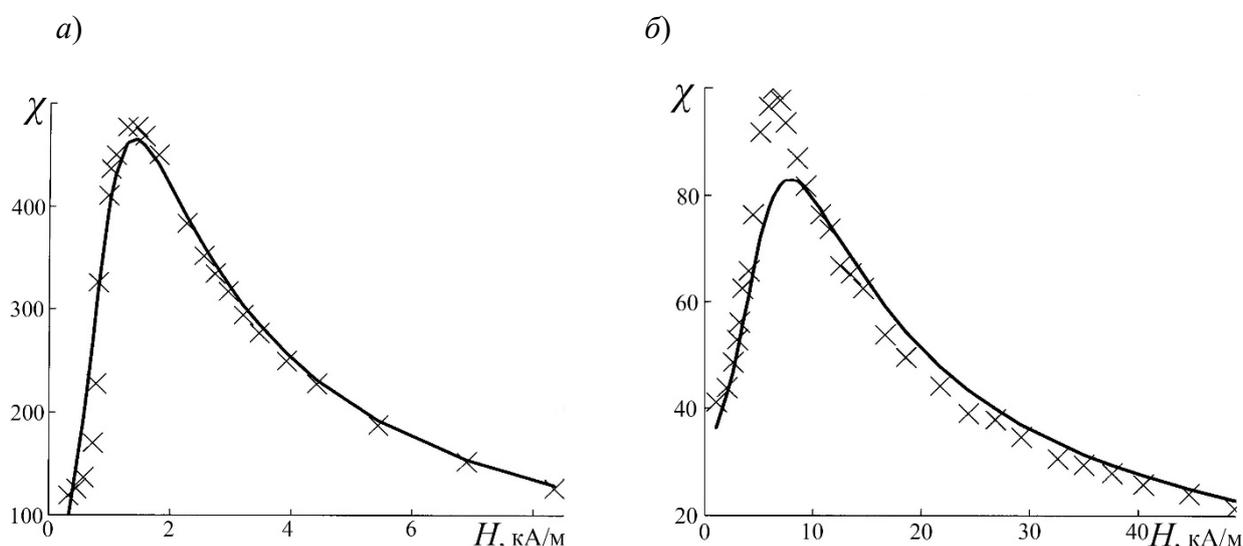


Рис. 2. Зависимость магнитной восприимчивости χ стали ШХ15 в состоянии поставки (а) и закаленной (б), магнитные свойства которых приведены в табл. 1, от напряженности H намагничивающего поля. χ – экспериментальные результаты по [8]; сплошная кривая – расчет по формулам (1), (4), (5) с использованием результатов измерения H_c , M_s и M_r (см. табл. 1)

Табл. 1. Магнитные параметры стали ШХ15 по [8] и углеродистых сталей по [5, табл. 2]

Марка стали	Термическая обработка, содержание углерода С, %	Магнитные параметры, кА/м		
		H_c	M_s	M_r
ШХ15	Состояние поставки	0,848	1115	780
	Закалка от 850 °С, без отпуска	4,75	1165	713
Углеродистая	С = 0,52	0,487	1630	749
	С = 0,69	0,502	1620	883
	С = 0,99	0,598	1506	792
	С = 1,73	1,000	1520	796

По своим магнитным параметрам использованная для анализа сталь ШХ15 охватывает диапазон изменения свойств конструкционных сталей.

Представленные на рис. 2 данные показывают, что результаты расчета зависимости $\chi(H)$ по формулам (1), (4), (5) близки к результатам эксперимента. Это подтверждают и результаты (рис. 3) статистической обработки связи между рассчитанными и измеренными значениями магнитной восприимчивости стали ШХ15 на кривых Столетова.

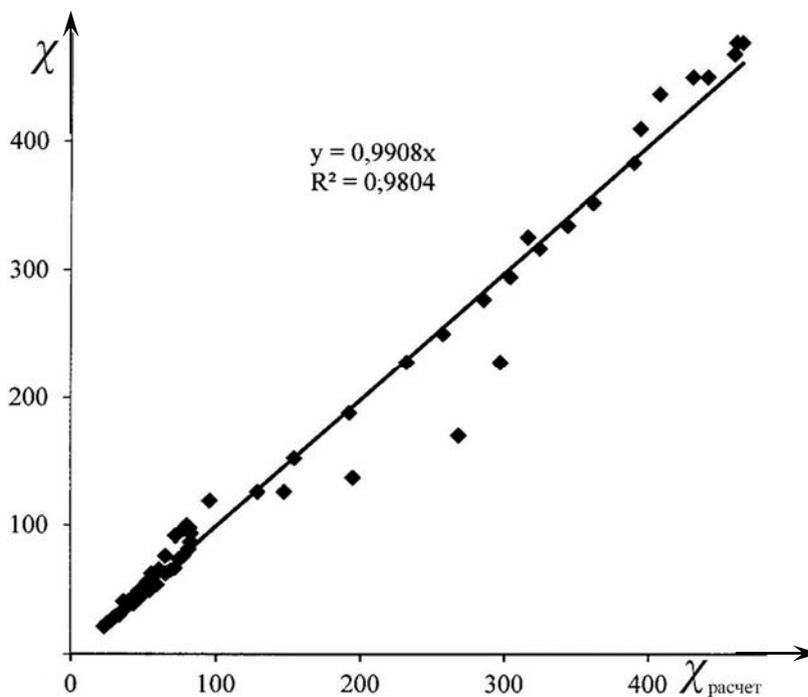


Рис. 3. Корреляционное поле между результатами измерения значений магнитной восприимчивости χ стали ШХ15 на кривых Столетова и их расчета по формулам (1), (4), (5) по данным, приведенным на рис. 2

Коэффициент корреляции между ними превысил значение 0,99, а среднеквадратическое отклонение составило 8,7 %. Таким образом, применение формул (4) и (5) совместно с формулой (1) исключает необходимость измерения параметров χ_a и M_C для расчета зависимости $\chi(H)$ на кривой Столетова сталей. Значения χ могут быть рассчитаны лишь по величинам H и H_c , M_s и M_r стали, измеренных на предельной петле гистерезиса. Данные о H_c , M_s и M_r почти всех известных сталей приведены в литературе. Это позволяет использовать формулы (4) и (5) совместно с формулой (1) для анализа влияния магнитных свойств материалов на характер зависимости $\chi(H)$ в разных условиях намагничивания.

В качестве **примера применения разработанных формул** проведем анализ влияния содержания углерода в стали на зависимости $\chi(H)$. Результаты

расчета этих зависимостей представлены на рис. 4. Для расчета использованы данные [5] о магнитных свойствах углеродистых сталей.

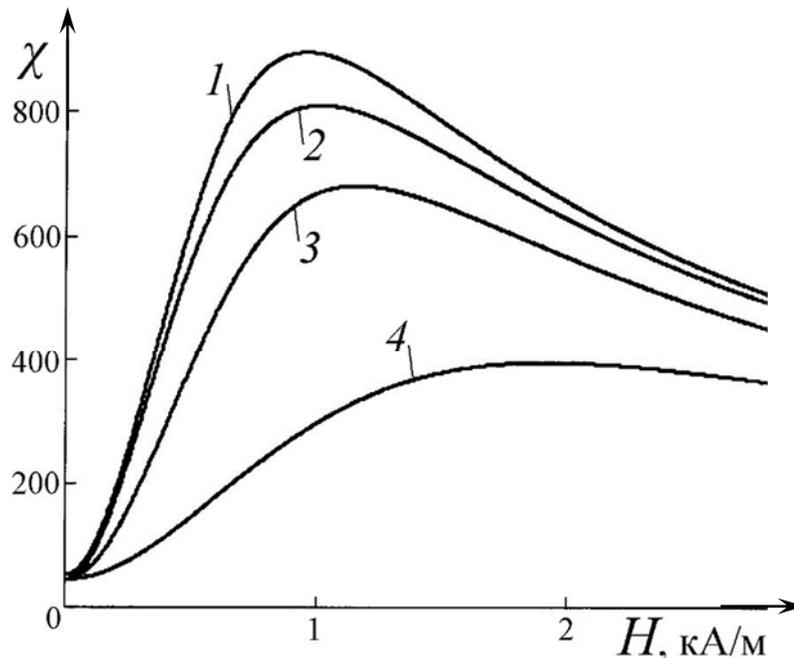


Рис. 4. Результаты расчета по формулам (1), (4), (5) кривых Столетова углеродистых сталей с магнитными свойствами по таблице [5]: 1–4 – соответствуют содержанию углерода 0,52 %; 0,69 %; 0,99 % и 1,73 %

Анализ представленных на рис. 4 зависимостей $\chi(H)$ углеродистых сталей показал, что величину $\chi > 600$ в диапазоне полей $0,5 \leq H, \text{ кА/м} \leq 2$ обеспечивает сталь с содержанием углерода $C \leq 0,69 \%$.

В приведенном примере применение разработанных формул позволило обоснованно выбрать оптимальную по магнитным свойствам углеродистую сталь для электротехнического сердечника, используемого в заданном диапазоне намагничивающих полей. При этом анализ был проведен только на основании справочных данных без изготовления образцов и трудоемких прецизионных измерений с их применением.

Выводы. В результате исследований обоснована правомерность использования в технических расчетах кривой $\chi(H)$ Столетова сталей формул (1), (4), (5) для расчета их H_c , M_r и M_s , измеренных на предельной петле гистерезиса. Возможность применения разработанных формул проиллюстрирована обоснованным выбором оптимального по магнитным свойствам материала стального сердечника только на основании общедоступных справочных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 8.377–80.** Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. – Москва: Изд-во стандартов, 1986. – 21 с.
2. Магнитные измерения / Е. Т. Чернышев [и др.]. – Москва: Изд-во стандартов, 1969. – 248 с.
3. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: Урал. отд-ние РАН, 2005. – 218 с.
4. **Тикадзуми, С.** Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. – Москва: Мир, 1987. – 419 с.
5. **Михеев, М. Н.** Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки / М. Н. Михеев, В. М. Морозова. – Москва: ОНТИ по приборостроению ЦНИИКА, 1964. – 46 с.
6. **Сандомирский, С. Г.** Расчет кривой Столетова конструкционных сталей по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2022. – № 1. – С. 18–23.
7. **Сандомирский, С. Г.** Расчёт основной кривой намагничивания конструкционных сталей по результатам измерений параметров предельной петли гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2017. – № 2. – С. 54–57.
8. **Мельгуй, М. А.** Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов / М. А. Мельгуй, Э. А. Шидловская // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 10–18.
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_work@mail.ru.

УДК 620.179.147

ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАНАТОВ ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРЯДЕЙ

A. V. SEMENOV

ООО «ИНТРОН ПЛЮС»

Москва, Россия

UDC 620.179.147

EDDY CURRENT PROBE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF MULTI-STRAND STAY CABLES

A. V. SEMENOV

Аннотация. Статья посвящена вихретоковому контролю канатов из параллельных прядей (стрендовых канатов). Основным препятствием в применении вихретокового метода является помеха от неоднородности магнитных свойств стали. Подавление указанной помехи путем стабилизации магнитных свойств в результате намагничивания до состояния, близкого к магнитному насыщению, в данном случае практически не осуществимо ввиду конструктивных особенностей вант. В статье кратко описана полученная на основе численного моделирования конфигурация вихретокового преобразователя (ВТП), повышающего достоверность обнаружения дефектов без стабилизации магнитных свойств объекта контроля (ОК), и приведены результаты экспериментальной проверки выводов, полученных в ходе численного моделирования.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, стрендовые канаты, помеха.

Abstract. The article is devoted to eddy current nondestructive testing of multi-strand stay cables. The main obstacle to the use of the eddy current method is noise from inhomogeneity of magnetic properties of the steel. Suppression of this noise by stabilizing the magnetic properties as a result of magnetization by a strong magnetic field in this case is practically not achievable due to the design features of the stay cables. The article briefly describes the configuration of the eddy current probe obtained on the basis of numerical modeling which increases the reliability of defects detection without stabilizing the magnetic properties of the test object, and presents the results of experimental verification of the conclusions obtained during numerical modeling.

Keywords: eddy current testing, multi-strand stay cables, noise.

Введение. Стальные канаты широко используются для решения разных технических задач. Существует большое количество разных типов стальных канатов, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками и имеет свою сферу применения. В последние десятилетия получили значительное распространение так называемые стрендовые канаты. Стренд (дословно прядь) – это специальный высокопрочный канат, как правило, выполненный из семи стальных проволок и имеющий защитное полиэтиленовое покрытие. Все стренды каната проходят внутри общей защитной оболочки из полиэтилена высокой плотности [1, 2].

Основной сферой применения стрендовых канатов являются ванты, т. е. неподвижные канаты, предназначенные для удержания различных конструкций. В частности, такие канаты нашли широкое применение в области

строительства вантовых мостов, где ванты являются одними из основных несущих элементов, что делает актуальной задачу неразрушающего контроля целостности стрендовых канатов [3].

Анализ используемых для неразрушающего контроля стрендовых канатов методов [4] показывает, что все они имеют существенные ограничения и недостатки. Магнитный метод требует применения громоздких систем намагничивания, что повышает трудоемкость контроля, а для стрендовых канатов большого диаметра делает контроль практически невозможным, т. к. сила притяжения системы намагничивания к стрендам совместно с силой тяжести с большой вероятностью приведут к повреждению внешней защитной оболочки ванты. Возможность доступа в лучшем случае лишь к торцам стрендов ограничивает использование акустических методов с контактным возбуждением. Применение акустических методов с бесконтактным возбуждением ограничено необходимостью создания сильных магнитных полей по всему сечению каната, что приводит к недостаткам, указанным для магнитного метода. Пассивные акустические методы ограничены в основном системами мониторинга и, соответственно, не могут быть использованы для оперативного контроля состояния объекта. Оптический и визуальный методы контроля достоверно позволяют обнаружить лишь внешние дефекты. Применение радиографического метода ограничивают трудоемкость и повышенные требования по обеспечению безопасности работ, что, в свою очередь, приводит к высокой стоимости контроля.

Таким образом, актуальной является задача поиска метода неразрушающего контроля, позволяющего преодолеть указанные ограничения и недостатки.

Сложности использования вихретокового вида. Одним из видов неразрушающего контроля, не нашедшим пока широкого применения для дефектоскопии стрендовых канатов, является вихретоковый вид неразрушающего контроля. Вихретоковый вид способен обеспечить высокую производительность, относительно малый вес вихретокового преобразователя (ВТП), бесконтактность. Затрудняет использование вихретокового вида на объектах из ферромагнитных материалов помеха от структурных неоднородностей стали [3, 5]. Опыты показывают, что на фоне помехи особенно сложно обнаруживать сигналы от дефектов, расположенных во внутренних слоях каната. Традиционный способ уменьшения указанной помехи путем стабилизации магнитных свойств в результате намагничивания до состояния, близкого к магнитному насыщению, в данном случае практически не реализуем, т. к. приводит к описанным выше недостаткам и ограничениям магнитного метода. Таким образом, ВТП, предназначенный для дефектоскопии стрендовых канатов, должен обеспечивать достоверное обнаружение дефектов без стабилизации магнитных свойств объекта контроля.

Численное моделирование. Разработка ВТП, соответствующего указанным требованиям, проводилась на основе численной модели [6], позволяющей моделировать вихретоковый контроль стрендовых канатов. Рассматривались сигналы, обусловленные локальными дефектами (ЛД) и протяженными дефектами [3, 7, 8].

Результаты численного моделирования [8] показали, что для традиционно используемого ВТП на основе протяженной катушки возбуждения амплитуда сигнала от ЛД во внешнем слое каната более чем в 3 раза превышает сигнал от аналогичного дефекта в центральном слое. Можно предположить, что та составляющая помехи, которая обусловлена схожим с моделируемым дефектом изменением электромагнитных свойств, также зависит от глубины его залегания в канате. В таком случае неоднородность магнитных свойств во внешнем слое будет вносить преобладающий вклад в помеху, в результате чего помеха, вызванная внешними слоями, будет скрывать сигналы от дефектов во внутренних слоях.

Результаты численного моделирования [8] показали, что избежать указанных недостатков позволяет ВТП, возбуждающий неоднородное электромагнитное поле в зоне контроля. Одним из вариантов такого преобразователя может быть показанный на рис. 1 ВТП на основе «узкой» возбуждающей катушки, протяженность которой в осевом направлении намного меньше её диаметра.

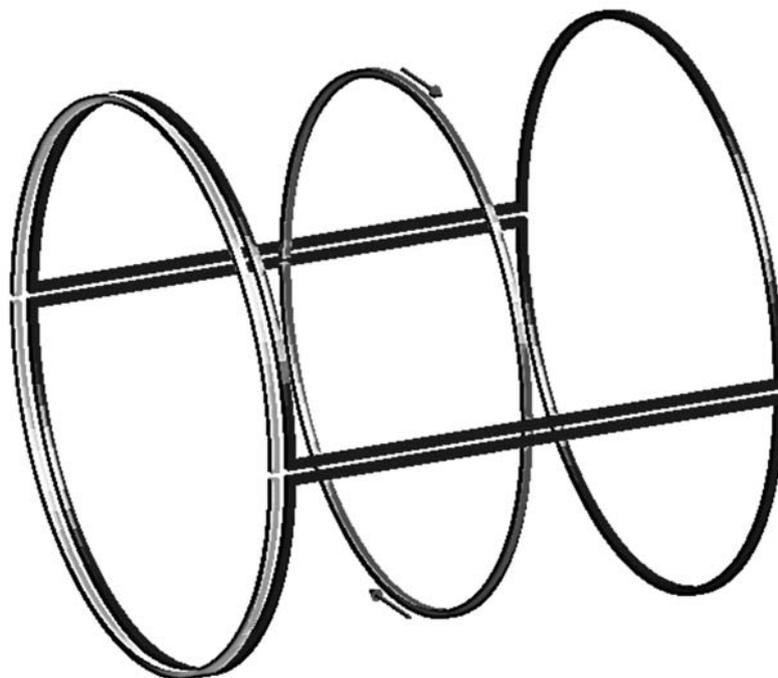


Рис. 1. ВТП на основе «узкой» катушки возбуждения: красным цветом показана возбуждающая катушка, синим – катушка для обнаружения ЛД, зеленым – катушка для измерения ПС

Для такого ВТП соотношение сигналов от дефектов в разных слоях имеет выраженную зависимость от расстояния между измерительными катушками (базы ВТП) для ЛД и расстояния между измерительной и возбуждающей катушками для протяженных дефектов. Существуют диапазоны значений указанных величин, обеспечивающие преимущественную чувствительность к дефектам во внешнем слое, преимущественную чувствительность к дефектам во внутренних слоях или равную чувствительность к дефектам во внешнем и

внутренних слоях. Таким образом, использование ВТП, обеспечивающего, например, равную чувствительность к дефектам во внешнем слое и внутренних слоях, повысит совокупную достоверность обнаружения дефектов за счет повышения соотношения сигнал/помеха для дефектов, расположенных во внутренних слоях [8].

Для проверки выводов, полученных в ходе численного моделирования, были использованы масштабные модели и макеты стрендовых канатов.

Масштабная модель. Ввиду большой массы стрендовых канатов создание макета стрендового каната, позволяющего провести полноценную проверку результатов численного моделирования, является трудоемкой задачей. В связи с этим для указанных целей была изготовлена масштабная модель. Масштабная модель каната выполнена из металлических прутков, помещенных в изоляционный материал. Один пруток соответствовал одному стренду. Прутки были уложены параллельно друг другу. Поперечное сечение в любом месте сборки было близко по форме к шестиграннику. Число прутков в сборке изменялось от 19 (три слоя) до 91 (шесть слоев). Во всех слоях, за исключением второго, были реализованы имитаторы компактных дефектов в виде обрыва прутка (рис. 2). Расстояние между концами прутков имитатора компактного дефекта составляло три диаметра прутка.

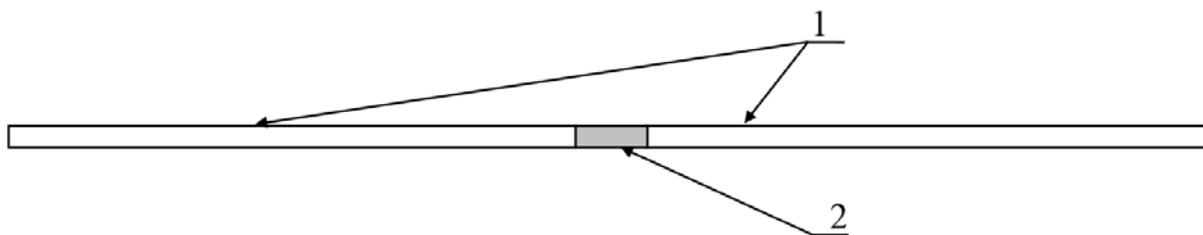


Рис. 2. Имитатор компактного дефекта: 1 – стальной пруток; 2 – диэлектрическая прокладка

Конструкция макета ВТП позволяла изменять расстояние между измерительными катушками и использовать различную конфигурацию обмотки возбуждения (узкая/протяженная). Масштабная модель стрендового каната и масштабная модель ВТП показаны на рис. 3. Для получения сигнала от компактного дефекта в разных слоях сборки осуществлялось перемещение имитатора ЛД относительно ВТП. Для получения сигнала от распределенного дефекта в соответствующем слое вытягивался пруток целиком. ВТП в обоих случаях оставался неподвижным относительно сборки прутков.

На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны значения следующей величины (*относительная вариация сигнала*): $\delta = (\max \Delta U_{\text{вн}^*} - \min \Delta U_{\text{вн}^*}) / \Delta U_{\text{вн}^* \text{центр}}$, где $\max \Delta U_{\text{вн}^*}$ – модуль максимальной амплитуды сигнала среди сигналов от расположенных в разных слоях каната дефектов, $\min \Delta U_{\text{вн}^*}$ – модуль минимальной амплитуды сигнала среди сигналов от расположенных в разных слоях каната дефектов, $\Delta U_{\text{вн}^* \text{центр}}$ – модуль амплитуды сигнала от дефекта в центральном слое.

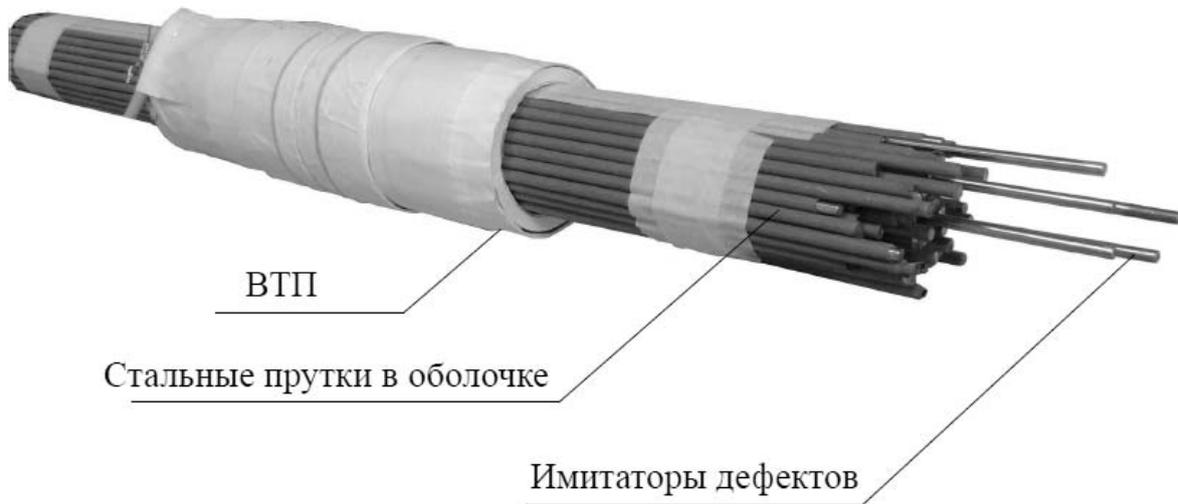


Рис. 3. Испытательный стенд (масштабная модель стренового каната, масштабная модель ВТП, имитаторы дефектов)

На рис. 4 и 5 в качестве примера показаны зависимости относительной вариации амплитуды сигнала ЛД от расстояния между измерительными катушками (базы) дифференциального ВТП на основе «узкой» и «протяженной» катушек возбуждения для масштабных моделей канатов, содержащих различное количество слоёв.

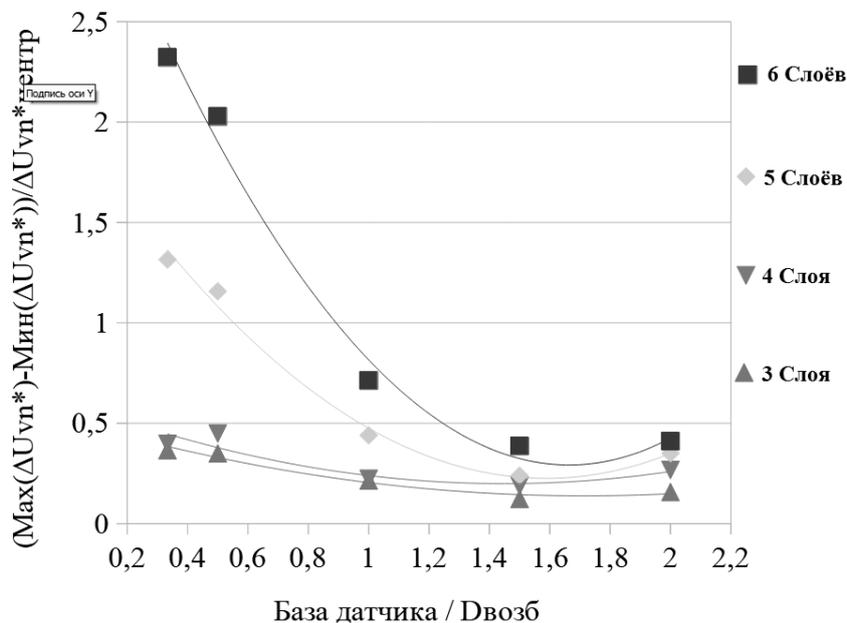


Рис. 4. Влияние базы дифференциального ВТП с узкой катушкой возбуждения на относительную вариацию сигналов ЛД

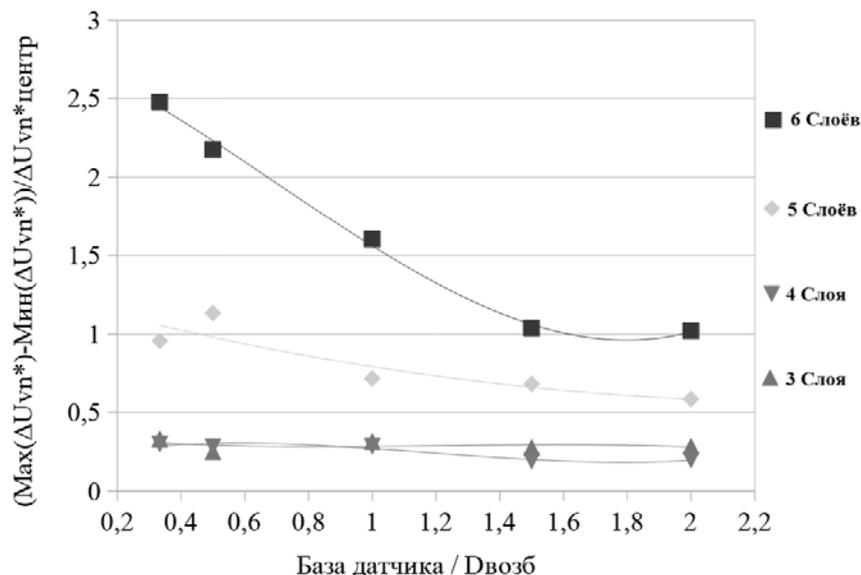


Рис. 5. Влияние базы дифференциального ВТП с протяженной катушкой возбуждения на относительную вариацию сигналов ЛД

Полученные зависимости подтвердили выводы, сделанные по результатам численного моделирования. Если для ВТП на основе протяженной катушки возбуждения сигналы от ЛД в различных слоях каната имеют сильно отличающиеся значения вне зависимости от базы датчика, то для ВТП на основе узкой катушки возбуждения существует такая база, при которой сигналы от ЛД во всех слоях имеют близкие значения.

Аналогично экспериментальные данные подтвердили существование положения измерительной катушки абсолютного ВТП с узкой катушкой возбуждения, обеспечивающего близкие чувствительности для протяженных дефектов.

Макет каната. В связи с тем, что масштабная модель может не учитывать характерные для реального стрендового каната особенности, были изготовлены макеты стрендовых канатов. Макеты позволяли имитировать дефекты только в центральном и внешнем слоях. На макетах были проведены эксперименты, подтвердившие выводы, сделанные относительно ВТП на основе узкой и протяженной катушек возбуждения. На рис. 6 в качестве примера приведены зависимости размаха сигнала дифференциального ВТП, вызванного перемещением конца стренда во внешнем слое и в центральном слое, от базы дифференциального ВТП. Видно, что кривые пересекаются, т. е. существует база ВТП, обеспечивающая близкую чувствительность к дефектам во внешнем и центральном слоях, что соответствует результатам, полученным ранее на численной модели, и результатам на масштабной модели.

Выводы. Экспериментальные данные подтверждают сделанный в [8] на основе результатов численного моделирования вывод о возможности изготовления ВТП, обеспечивающего близкую чувствительность к дефектам, расположенным в разных слоях стрендового каната. Это, в свою очередь,

позволяет повысить достоверность обнаружения дефектов без стабилизации магнитных свойств ОК.

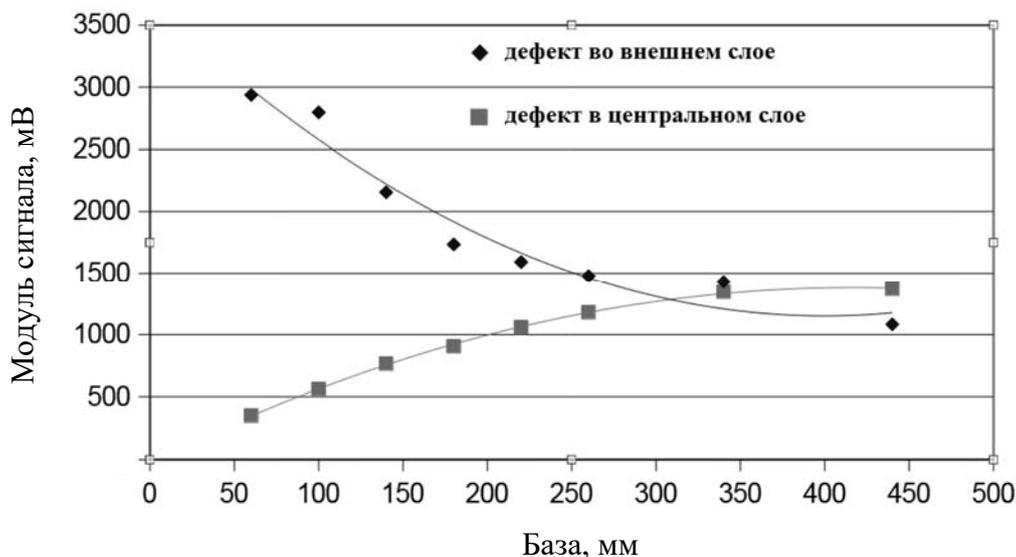


Рис. 6. Зависимость величины размаха сигнала дифференциального ВТП, вызванного дефектами в центральном и внешнем слоях, от базы датчика

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. HD Stay Cables [Electronic resource]. – Mode of access: www.freyssinet.com.
2. SSI 2000 stay cable system [Electronic resource]. – Mode of access: www.vsl.com.
3. Семенов, А. В. Неразрушающий контроль стрендовых канатов больших диаметров / А. В. Семенов, Д. А. Слесарев // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 4. – С. 20–27.
4. Tabatabai, H. Maintenance and Inspection of Bridge Stay Cable Systems / H. Tabatabai // FHWA Workshop on Wind-Induced Vibration of Cable Stayed Bridges At: conf. – St. Louis, Missouri, 2006.
5. Вихретоковый проходной преобразователь для дефектоскопии продольно-протяженных изделий: пат. RU 2146362. – Опубл. 10.03.2000.
6. Семенов, А. В. Математическое моделирование вихретокового неразрушающего контроля стрендовых канатов / А. В. Семенов, Д. А. Слесарев // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 11. – С. 4–11.
7. РД 03-348-00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения. – Москва: Госгортехнадзор России, 2000.
8. Семенов, А. В. Повышение соотношения сигнал/помеха при вихретоковом контроле за счет создания неоднородного электромагнитного поля / А. В. Семенов // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25, № 9. – С. 4–13.

E-mail: asemenov@intron.ru.

УДК 621.3

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТУРБИДИМЕТРА С АДАПТИВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

М. М. СОТНИК, А. А. АФАНАСЬЕВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.3

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE CONVERSION FUNCTION OF A TURBIDIMETER WITH ADAPTIVE PARAMETERS

M. M. SOTNIK, A. A. AFANASIEV

Аннотация. Разработана структурная схема двухканального оптико-электронного преобразователя турбидиметра, составлена и исследована его функция преобразования. Показано, что разбиение диапазона измерения и индивидуальная установка параметров преобразователя обеспечивают квазилинейность функции преобразования и высокую чувствительность для каждого поддиапазона.

Ключевые слова: мутность, турбидиметр, оптико-электронный преобразователь, функция преобразования.

Abstract. A block diagram of a two-channel optical-electronic converter of a turbidimeter has been developed, its conversion function has been compiled and studied. It is shown that the division of the measurement range and the individual setting of the transducer parameters ensure the quasi-linearity of the transform function and high sensitivity for each subrange.

Keywords: turbidity, turbidimeter, optical-electronic converter, conversion function.

Большинство жидкостей, используемых человеком в процессе своей жизнедеятельности, существует в виде жидких дисперсных сред: эмульсий, суспензий, коллоидных растворов. Информацию о концентрации взвешенных частиц используют для управления многими технологическими процессами, экологического мониторинга, в научных исследованиях. Взвешенные в жидкости твердые частицы нарушают прохождение света через образец и создают количественную характеристику объекта контроля, называемую мутностью. Мутность можно также рассматривать как характеристику относительной прозрачности жидкости.

Работа мутномеров основана на каком-либо из методов, составляющих большую группу фотометрических методов анализа. Чаще всего мутность определяют турбидиметрическим методом с помощью соответствующих средств измерения, в которых фотоприемник расположен на оси излучения и регистрирует проходящее через контролируруемую жидкость ослабленное излучение.

Основным аналитическим выражением для турбидиметрического метода является выражение, связывающее интенсивность прошедшего через мутную среду света с концентрацией взвешенных частиц [1]:

$$I = I_0 e^{-\varepsilon_\lambda CL} = I_0 e^{-\tau L}, \quad (1)$$

где I , I_0 – интенсивности падающего и прошедшего через слой среды потоков соответственно; ε_λ – удельная экстинкция – параметр, показывающий ослабление света на единичной толщине зондируемого слоя в среде с единичной концентрацией дисперсной фазы на данной длине волны λ ; C – концентрации взвешенных частиц; L – толщина зондируемого слоя (длина оптического пути в контролируемой жидкости).

Величина

$$\tau = \varepsilon_\lambda C, \quad (2)$$

называемая мутностью, связывает светопропускание $T = I/I_0$ в слое мутной среды с толщиной L этого слоя.

Конструктивным параметром, определяющим как чувствительность, так и линейность турбидиметра, является длина оптического пути L . С ростом длины оптического пути растет чувствительность, но в ущерб линейности показаний из-за множественного рассеяния и поглощения. И наоборот, с уменьшением длины оптического пути растет линейность, но падает чувствительность прибора в области низких концентраций. Короткий оптический путь также увеличивает воздействие постороннего света. Эту проблему в турбидиметрах решают, изменяя длину оптического пути [2, 3].

В турбидиметрах используются как одноканальные оптические схемы, так и двухканальные [4, 5]. Последние обеспечивают более высокую точность измерений, однако и для них характерна высокая нелинейность функции преобразования.

Рассмотрим структурную схему двухканального оптико-электронного измерительного преобразователя (ОЭИП) турбидиметра (рис. 1).

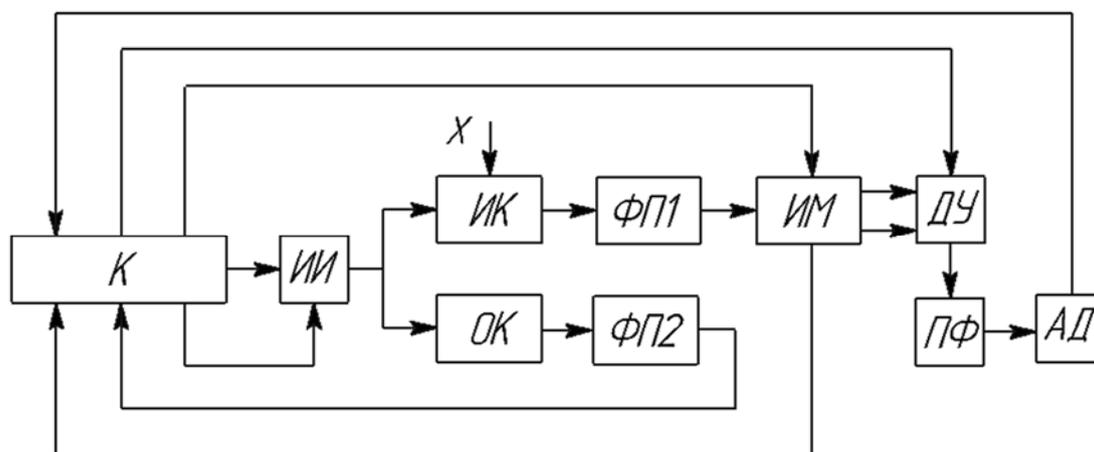


Рис. 1. Структурная схема двухканального оптико-электронного измерительного преобразователя турбидиметра

ОЭИП имеет источник излучения (ИИ), управляемый контроллером (К), измерительный и опорный каналы (ИК и ОК), фотоприемник (ФП1) в ИК и фотоприемник (ФП2) в ОК, измерительный мост (ИМ), дифференциальный усилитель (ДУ), полосовой фильтр (ПФ) и амплитудный детектор (АД). Контроллер обеспечивает в процессе измерений автоматический контроль и управление параметрами ИИ, ИМ и ДУ.

Отклонения потока излучения в ОК, не связанные с измеряемой величиной, регистрируются ФП2 и восстанавливаются контроллером до первоначального значения.

Сигнал с выхода АД, функционально связанный с контролируемым параметром X (мутностью τ), поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, встроенного в К для дальнейшего преобразования и обработки полученной измерительной информации.

Схема включения ФП1 в состав ИМ (рис. 2) позволяет сформировать в его диагонали напряжение $U_{ИМ}(\tau)$.

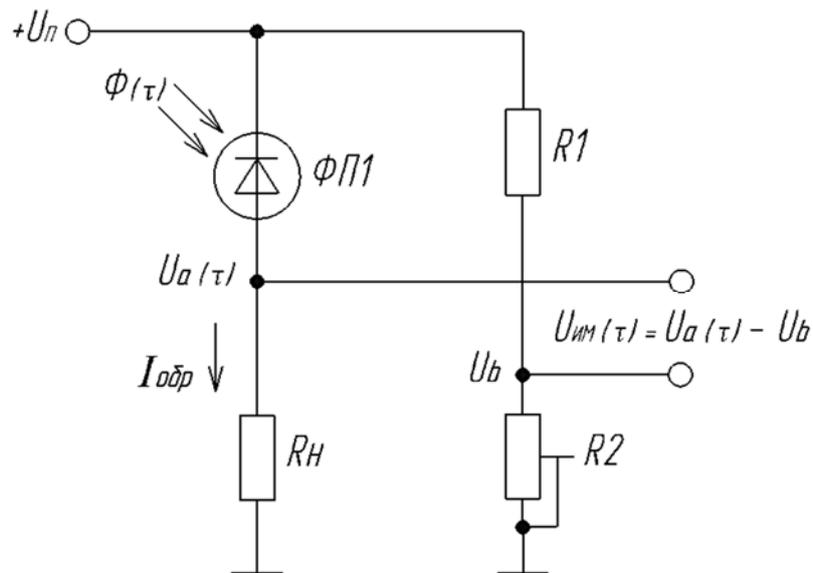


Рис. 2. Схема включения ФП1 в состав ИМ

$$U_{ИМ}(\tau) = U_a(\tau) - U_b = \Phi(\tau) S_{ФП1} \cdot R_H - U_{п} R_2 / (R_1 + R_2), \quad (3)$$

где $\Phi(\tau)$ – поток излучения, падающий на фотоприемник ФП1; $S_{ФП1}$ – спектральная чувствительность фотоприемника ФП1. Его величиной можно управлять с помощью К, изменяя сопротивление резистора R_2 .

Напряжение на выходе ОЭИП

$$U_{ОЭИП}(\tau) = U_{ИМ} \cdot K_y \cdot e^{-\tau L}, \quad (4)$$

где K_y – коэффициент усиления ДУ.

Исследование функции преобразования (4) при значении оптической базы $L = 5$ мм (рис. 3) и $L = 10$ мм (рис. 4) при постоянном значении коэффициента усиления ДУ $K_y = 2,2$ и значениях $U_{ИМ1} = 2,2$ В (при $\Phi(\tau) = \Phi_{\max}$), $U_{ИМ2} = 1,8$ В

(при $\Phi(\tau) = 0,9\Phi_{\max}$), $U_{ИМ3} = 1,41$ В (при $\Phi(\tau) = 0,8\Phi_{\max}$) и $U_{ИМ4} = 0,62$ В (при $\Phi(\tau) = 0,6\Phi_{\max}$) для τ , изменяющегося в диапазоне от 0 до 0,4, показывает, что при изменении мощности потока излучения нелинейность сохраняется во всем исследуемом диапазоне мутности τ , причем чувствительность метода резко падает при $\tau > 0,2$ с увеличением оптической базы L и снижением мощности излучения.

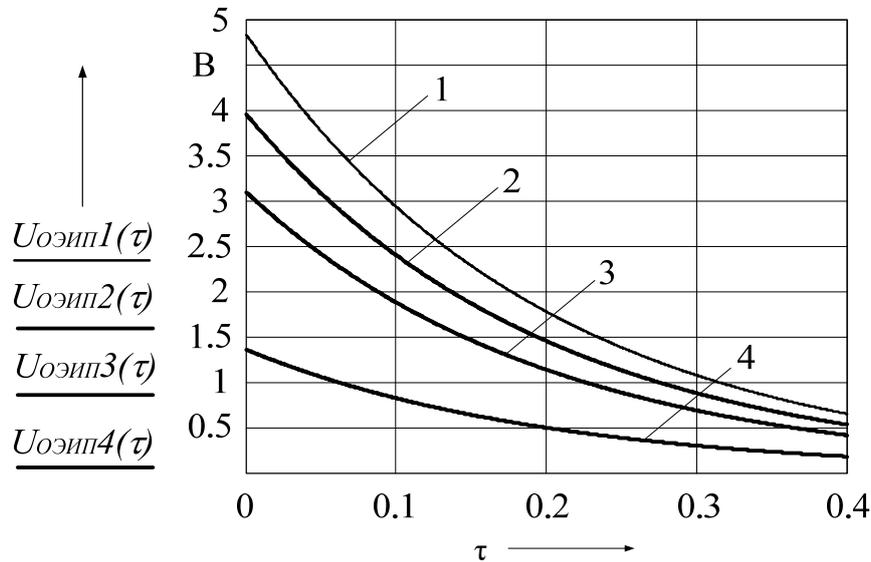


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения $OЭИП$ от мутности для $L = 5$ мм при разных значениях мощности потока излучения $\Phi(\tau)$

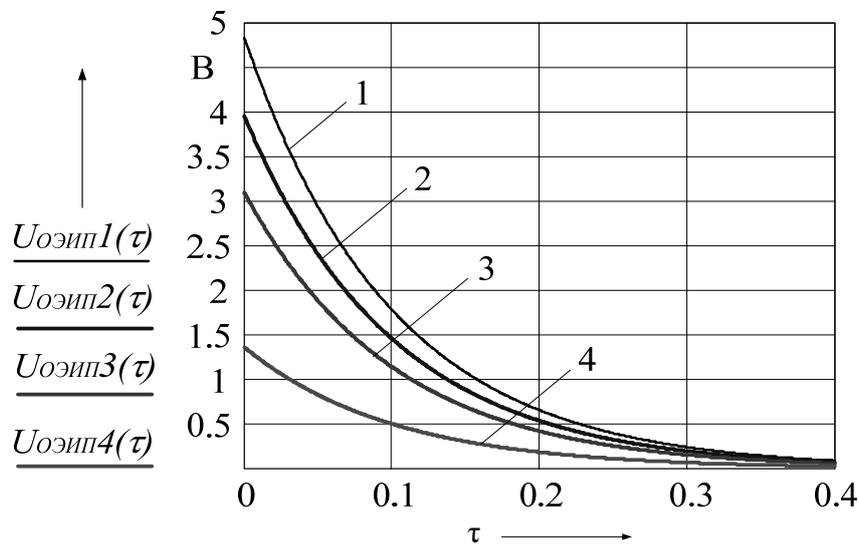


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения $OЭИП$ от мутности для $L = 10$ мм при разных значениях мощности потока излучения $\Phi(\tau)$

Получить квазилинейную зависимость функции преобразования можно, разделив диапазон значений τ на поддиапазоны ($\tau_1 = 0 \dots 0,1$; $\tau_2 = 0,1 \dots 0,2$; $\tau_3 = 0,2 \dots 0,3$; $\tau_4 = 0,3 \dots 0,4$) с установкой для каждого поддиапазона соответствующего коэффициента усиления ДУ и мощности излучения. Исследование функции (4) выполним для $L = 5$ мм.

В поддиапазоне $\tau_1 = 0 \dots 0,1$ при $K_{y1} = 8$ и $U_{им1} = 0,62$ В (при $\Phi = 0,6\Phi_{max}$) зависимость выходного напряжения $U_{оэип1}(\tau_1)$ имеет следующий вид (рис. 5).

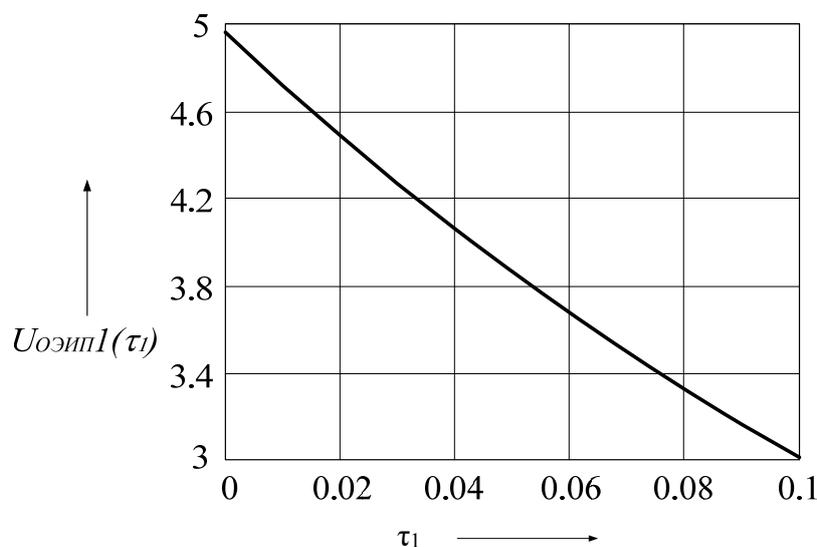


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения *ОЭИП* от мутности в поддиапазоне $\tau_1 = 0 \dots 0,1$

В поддиапазоне $\tau_2 = 0,1 \dots 0,2$ при $K_{y2} = 5,8$ и $U_{им2} = 1,41$ В (при $\Phi = 0,8\Phi_{max}$) зависимость выходного напряжения $U_{оэип2}(\tau_2)$ имеет вид, показанный на рис. 6.

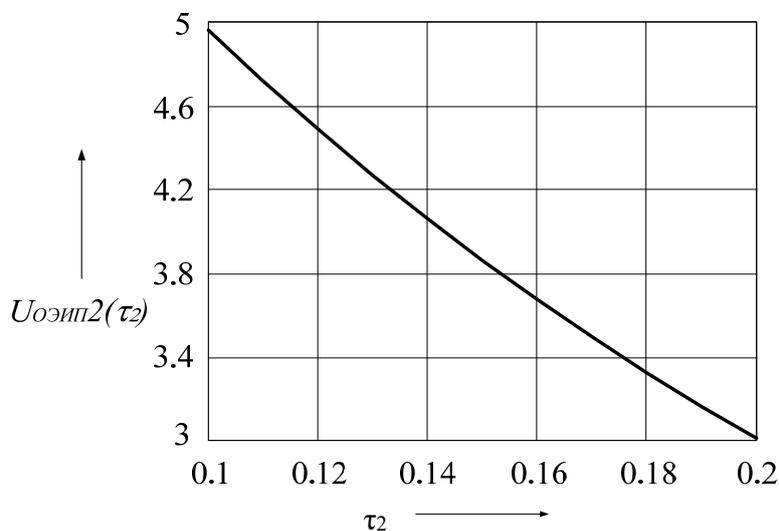


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения *ОЭИП* от мутности в поддиапазоне $\tau_2 = 0,1 \dots 0,2$

В поддиапазоне $\tau_3 = 0,2 \dots 0,3$ при $K_{y3} = 7,5$ и $U_{им3} = 1,8$ В (при $\Phi = 0,9\Phi_{max}$) зависимость выходного напряжения $U_{оэип3}(\tau_3)$ имеет следующий вид (рис. 7).

В поддиапазоне $\tau_4 = 0,3 \dots 0,4$ при $K_{y4} = 10$ и $U_{им4} = 2,2$ В (при $\Phi = \Phi_{max}$) зависимость выходного напряжения $U_{оэип4}(\tau_4)$ представлена на рис. 8.

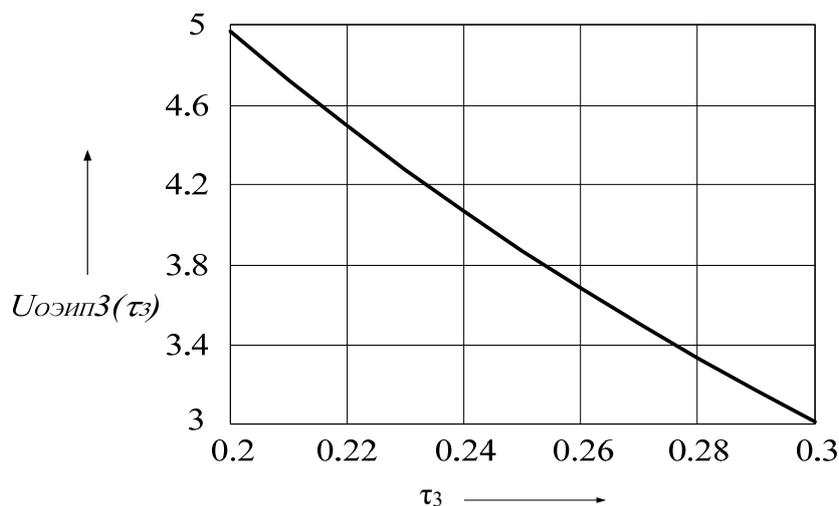


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения *ОЭИП* от мутности в поддиапазоне $\tau_3 = 0,2 \dots 0,3$

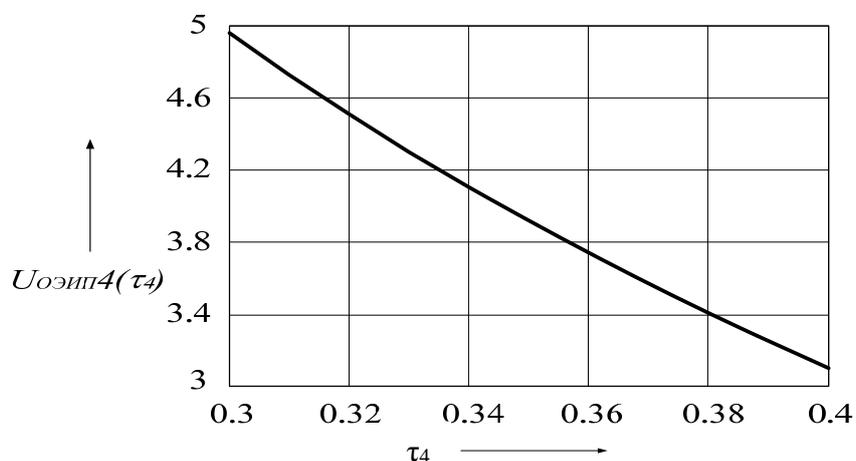


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения *ОЭИП* от мутности в поддиапазоне $\tau_4 = 0,3 \dots 0,4$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов, М. И. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа / М. И. Булатов, И. П. Калинин. – 5-е изд., перераб. – Ленинград: Химия, 1986. – 432 с.
2. Устройство для определения концентрации взвесей в жидкости: а. с. SU 1533482 / А. А. Афанасьев, В. Н. Усик, И. В. Мисник, А. П. Марков, А. П. Гапеев. – Оpubл. 01.09.1989.
3. Фетисов, В. С. Фотометрические полевые средства измерений концентрации жидких дисперсных систем / В. С. Фетисов. – Уфа : УГАТУ, 2005. – 233 с.
4. Устройство для измерения концентрации взвесей в жидкости: а. с. SU 1100543 / П. И. Марков, Н. П. Бусел, А. А. Афанасьев, И. Ф. Александрович. – Оpubл. 30.06.1984.
5. Афанасьев, А. А. Двухканальный оптоэлектронный преобразователь для средств фотометрического контроля / А. А. Афанасьев, М. М. Сотник, В. В. Писарик // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2022 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 310.

УДК 621.372.8:535

**СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ
В ХОДЕ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ*****Л. И. СОТСКАЯ¹, Е. А. ЧУДАКОВ², А. Б. СОТСКИЙ², К. Н. КРИВЕЦКИЙ³,
Н. И. СТАСЬКОВ²***¹Белорусско-Российский университет²Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

Могилев, Беларусь

³ООО «ЭссентОптикс»

Минск, Беларусь

UDC 621.372.8:535

**SPECTROPHOTOMETRY OF INTERFERENCE COATING DURING
ITS MANUFACTURE*****L. I. SOTSKAYA, E. A. CHUDAKOV, A. B. SOTSKY, K. N. KRIVETSKII,
N. I. STASKOV***

Аннотация. Разработан алгоритм решения обратной задачи спектрофотометрии слоев интерференционных покрытий в ходе их напыления. Представлены результаты обработки динамических спектров отражения для двухслойного покрытия $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ на подложке из стекла К8.

Ключевые слова: интерференционные покрытия, обратная задача спектрофотометрии растущего слоя.

Abstract. An algorithm for solving the inverse problem of spectrophotometry of layers of interference coatings during their deposition has been developed. The results of processing the dynamic reflection spectra for a two-layer $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ coating on a K8 glass substrate are presented.

Keywords: interference coatings, inverse problem of growing layer spectrophotometry.

Интерференционные покрытия на плоскопараллельных диэлектрических подложках широко используются в антибликовых и зеркальных системах. Качественное изготовление таких покрытий предполагает отслеживание технологического процесса в реальном времени. Для этой цели могут быть применены системы спектрофотометрического контроля параметров покрытий, встроенные непосредственно в вакуумные установки. Такие системы выпускает ООО «ЭссентОптикс» (Минск). Актуальной является проблема математического обеспечения работы названных систем. Она предполагает решение обратной оптической задачи о динамическом восстановлении толщины d_{lk} и спектра показателя преломления $\sigma_l(\lambda)$ растущего слоя. Здесь $l=1, 2, \dots$ – номер слоя в покрытии, отсчитанный от подложки (материалы слоев чередуются), λ – длина световой волны, k – номер, характеризующий процесс образования слоя, $k=0, 1, \dots, k_s$ ($d_{lk+1} > d_{lk}$,

$d_{l_0} = 0$, $d_{l_{k_s}} = d_l$). Известными являются спектры энергетического коэффициента отражения

$$R_{lk}(\lambda) = 0,5[R_{lk}^{(s)}(\lambda) + R_{lk}^{(p)}(\lambda)] \quad (1)$$

либо пропускания

$$T_{lk}(\lambda) = 0,5[T_{lk}^{(s)}(\lambda) + T_{lk}^{(p)}(\lambda)] \quad (2)$$

покрытия для частично когерентного света, измеряемые на дискретных длинах волн λ_j ($j = \overline{1, q}$, $\lambda_{j+1} > \lambda_j$). Здесь k – номер спектра, соответствующий толщине l -го слоя d_{lk} , $R_{lk}^{(\alpha)}(\lambda)$, $T_{lk}^{(\alpha)}(\lambda)$ – спектры $R_{lk}(\lambda)$, $T_{lk}(\lambda)$ для волн s - ($\alpha = s$), либо p - ($\alpha = p$) поляризации.

В работе представлен и апробирован экспериментально алгоритм решения названной обратной задачи. Материал представляет собой развитие подхода, предложенного в [1].

Пусть наноразмерное интерференционное покрытие 4 текущей суммарной толщины d наносится на плоскопараллельную диэлектрическую пластину 3 с известными диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_s = (n_s - ik_s)^2$ и толщиной D (рис. 1).

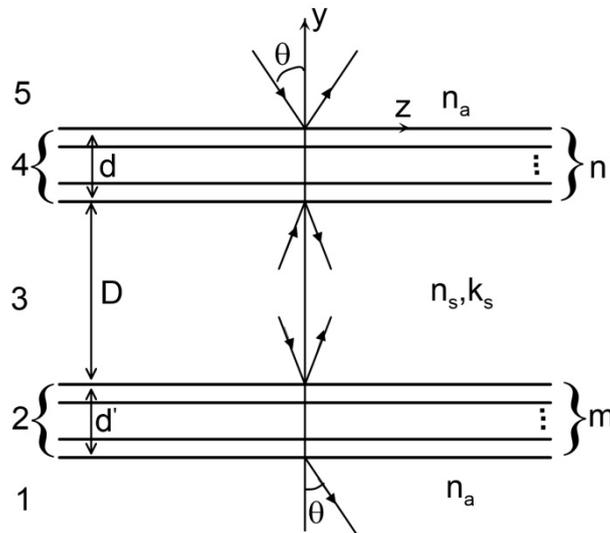


Рис. 1. Интерференционное покрытие на плоскопараллельной подложке

На обратной стороне пластины имеется некоторая известная стационарная слоистая среда 2 толщины d' . Вся структура окружена прозрачной средой с показателем преломления n_a .

При освещении структуры плоской световой волной с длиной когерентности g , удовлетворяющей условиям $g \ll D$, $g \gg d$, $g \gg d'$, падающей под углом θ , могут быть получены следующие выражения [2]:

$$R_k^{(\alpha)}(\lambda) = \left| r_{53}^{(\alpha)} \right|^2 + \left| r_{31}^{(\alpha)} t_{35}^{(\alpha)} t_{53}^{(\alpha)} \exp(-2ik_y^{(s)} D) \right|^2 \left[1 - \left| r_{31}^{(\alpha)} r_{35}^{(\alpha)} \exp(-2ik_y^{(s)} D) \right|^2 \right]^{-1}; \quad (3)$$

$$T_k^{(\alpha)}(\lambda) = \left| t_{53}^{(\alpha)} t_{31}^{(\alpha)} \exp(-ik_{ys} D) \right|^2 \left[1 - \left| r_{31}^{(\alpha)} r_{35}^{(\alpha)} \exp(-2ik_{ys} D) \right|^2 \right]^{-1}, \quad (4)$$

где $r_{53}^{(\alpha)}$, $r_{31}^{(\alpha)}$, $r_{35}^{(\alpha)}$, $t_{53}^{(\alpha)}$, $t_{35}^{(\alpha)}$, $t_{31}^{(\alpha)}$ – когерентные амплитудные коэффициенты отражения либо прохождения плоской волной слоистых сред 2 и 4 (см. рис. 1), $k_y^{(s)} = k_0 \sqrt{\varepsilon_s - (n_a \sin \theta)^2}$, $k_0 = 2\pi\lambda^{-1}$.

Анализ выражений (1)–(4) в представляющем основной практический интерес случае $\theta \rightarrow 0$ позволяет получить явные зависимости R_{lk} и T_{lk} от искомым параметров $\sigma_l(\lambda)$ и d_{lk} :

$$\Delta_{lk}(\lambda_j) = f_{lk}(\lambda_j); \quad (5)$$

$$\Delta_{lk}(\lambda_j) = 2n_s n_a (1+r)(1-r)^{-1}; \quad (6)$$

$$r = \frac{\left| r_{31} \exp(-2ik_y^{(s)} D) \right|^2 - R_{lk}(\lambda_j)}{\left| r_{31} \exp(-2ik_y^{(s)} D) \right|^2 (2 - R_{lk}(\lambda_j)) - 1}, \quad (7)$$

в случае регистрации $R_{lk}(\lambda_j)$, а в случае регистрации $T_{lk}(\lambda_j)$

$$r = \frac{n_s T_{lk}(\lambda_j) - \left| t_{31}^2 \exp(-2ik_y^{(s)} D) \right|}{(n_s \left| r_{31}^2 \exp(-2ik_y^{(s)} D) \right| T_{lk}(\lambda_j) - \left| t_{31}^2 \right| \left| \exp(-2ik_y^{(s)} D) \right|}.$$

Функция $f_{lk}(\lambda_j)$ зависит от подлежащих определению искомого спектра $\sigma_l(\lambda_j)$ и толщины растущего слоя покрытия d_{lk} :

$$f_{lk}(\lambda_j) = [\sin \varphi_l - \sin(2k_0 \sigma_l d_{lk} + \varphi_l)] (1 - n_a^2 \sigma_l^{-2}) \rho_l + G_l, \quad (8)$$

где величины ρ_l , φ_l и G_l определяются параметрами покрытия, сформированного до нанесения рассматриваемого слоя:

$$\rho_l \sin \varphi_l = 0,5[\sigma_l^2 (L_{11}^2 + n_s^2 L_{12}^2) - (L_{21}^2 + n_s^2 L_{22}^2)], \quad \rho_l \cos \varphi_l = \sigma_l (L_{12} L_{22} n_s^2 + L_{11} L_{21}),$$

$$G_l = n_a^2 (L_{11}^2 + n_s^2 L_{12}^2) + L_{21}^2 + n_s^2 L_{22}^2,$$

2×2 матрица \mathbf{L} имеет вид произведения $\mathbf{L} = \mathbf{M}_{l-1} \mathbf{M}_{l-2} \dots \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – единичная матрица, \mathbf{M}_k – 2×2 матрица с элементами,

$$(\mathbf{M}_k)_{11} = (\mathbf{M}_k)_{22} = \cos(k_0 \sigma_k d_k), (\mathbf{M}_k)_{12} = \frac{\sin(k_0 \sigma_k d_k)}{\sigma_k}, (\mathbf{M}_k)_{21} = -\sigma_k \sin(k_0 \sigma_k d_k).$$

При фиксированных значениях l, k, q система q уравнений (5) с $q+1$ неизвестными $d_{lk}, \sigma_l(\lambda_j)$ ($j=\overline{1, q}$) не замкнута. В таком случае можно использовать две системы (5), отвечающие различным k , равным k_1 и $k_2 > k_1$. Данные системы состоят из $2q$ уравнений и содержат $2+q \ll 2q$ неизвестных величин $d_{lk_1}, d_{lk_2}, \sigma_l(\lambda_j)$. Ситуация, в которой число искомых параметров меньше числа наложенных на них условий, характерна для обратных оптических задач. Она предполагает использование метода наименьших квадратов.

В качестве целевой функции этого метода выбрана

$$F = \sum_{j=1}^q [\Delta_{lk_1}(\lambda_j) - f_{lk_1}(\lambda_j)]^2 + [\Delta_{lk}(\lambda_j) - f_{lk}(\lambda_j)]^2, \quad (9)$$

где $k > k_1$. Но вычислительные эксперименты по отысканию минимумов функции (9) относительно $d_{lk_1}, d_{lk}, \sigma_l(\lambda_j)$ для различных интерференционных покрытий с известными параметрами привели к разрывным зависимостям $\sigma_l(\lambda_j)$, отличающимся от точных. Этот дефект можно связать с наличием периодической функции $\sin(2k_0\sigma_l d_{lk} + \varphi_l)$ в (8). Для его устранения априори использован факт аналитичности функции $\sigma_l(\lambda)$. С этой целью данная функция представлялась полиномом Лагранжа – Чебышева степени N :

$$\sigma_l(\lambda) = \sum_{\kappa=0}^N x_{\kappa} \prod_{\delta \neq \kappa} (\lambda - \lambda_{\delta}) / \prod_{\delta \neq \kappa} (\lambda_{\kappa} - \lambda_{\delta}), \quad (10)$$

где $\kappa, \delta = 0, 1, \dots, N$, коэффициенты $x_{\kappa} = \sigma_l(\lambda_{\kappa})$ подлежат определению,

$$\lambda_{\kappa} = 0,5(\lambda_q - \lambda_1) \cos[0,5\pi(2(N - \kappa) + 1)(N + 1)^{-1}] + 0,5(\lambda_q + \lambda_1).$$

В представлении (10) задача содержит $N+3$ свободных параметров, определяемых из условия минимума функции (9). Численное тестирование предложенного решения в вычислительных экспериментах для ряда покрытий показало его высокую точность при $N \geq 6$.

Описанный алгоритм использован для обработки экспериментальных спектров $R_{lk}(\lambda)$, полученных при изготовлении двухслойного интерференционного покрытия, состоящего из слоя ZrO_2 ($l=1$) и слоя SiO_2 ($l=2$), наносимых методом электронно-лучевого испарения на подложку из стекла К8. Обратная сторона подложки была матирована, что в модели (7) соответствует выбору $r_{31} = 0$. В ходе напыления покрытия были измерены $k_s = 145$ спектров $R_{1k}(\lambda)$ и $k_s = 107$ спектров $R_{2k}(\lambda)$ в диапазоне $380,25 \text{ нм} < \lambda < 1091,85 \text{ нм}$ с шагом $0,6 \text{ нм}$. Запись каждого нового спектра осуществлялась через интервал времени 1 с .

На рис. 2 сопоставлены экспериментальные и теоретические спектры $R_{lk}(\lambda)$, найденные из выражений (5)–(8) после минимизации функции (9) при $k_1 = 20$. Как видно, теория и эксперимент практически неотличимы.

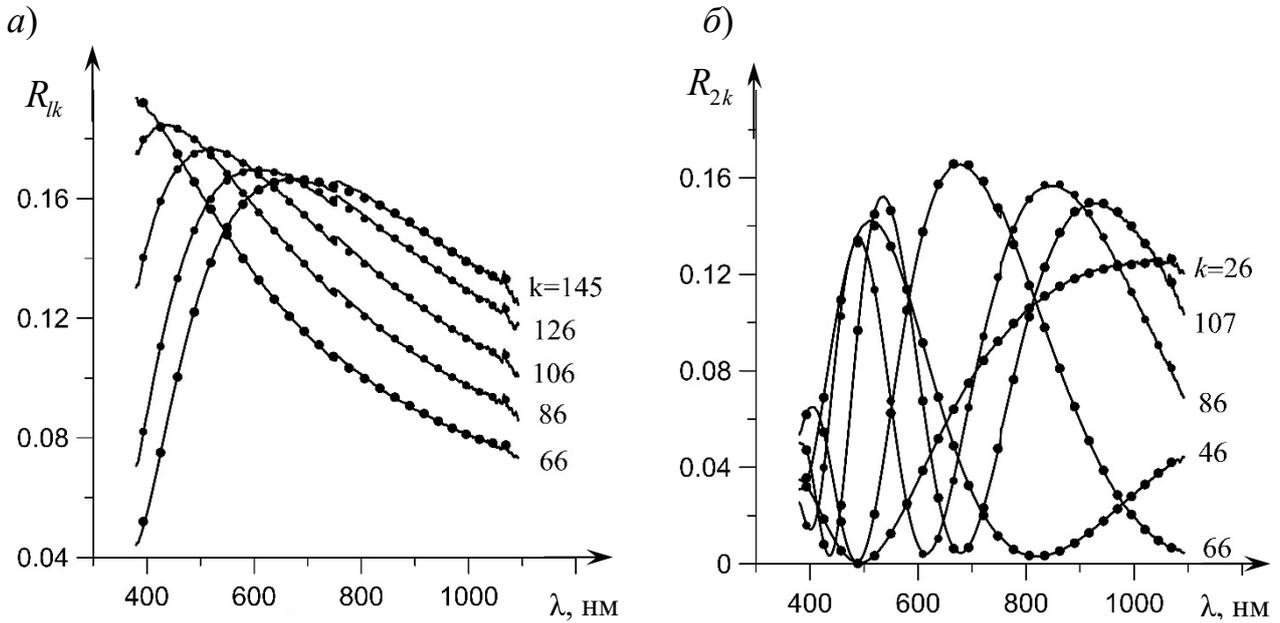


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные кривые) и теоретические (дискретные точки) спектры $R_{lk}(\lambda)$ для двухслойного покрытия: *a* – формирование слоя ZrO_2 ; *б* – формирование слоя SiO_2

Рис. 3 иллюстрирует результаты решения обратной оптической задачи для толщин слоев покрытия в ходе их роста.

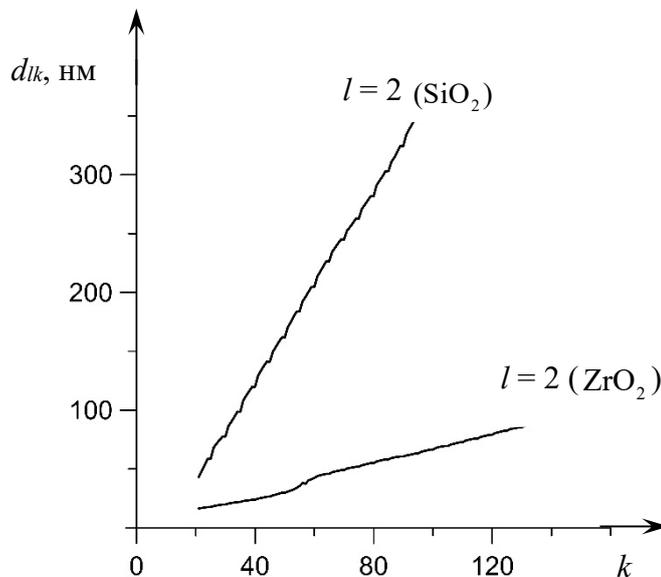


Рис. 3. Динамика роста слоев покрытия

На рис. 4 приведены восстановленные спектры показателей преломления слоев при различных k в (9). Видимая из рис. 3 и 4 зависимость спектра показателя преломления слоя от его толщины объясняется грубым характером использованной модели однородного слоя применительно к реальному слою в самом начале его роста. Стабилизация спектров, означающая рост адекватности данной модели, наблюдается по мере увеличения толщин слоев. Заметное отклонение спектров материалов слоев от спектров объемных материалов на рис. 4 можно объяснить пористостью слоев.

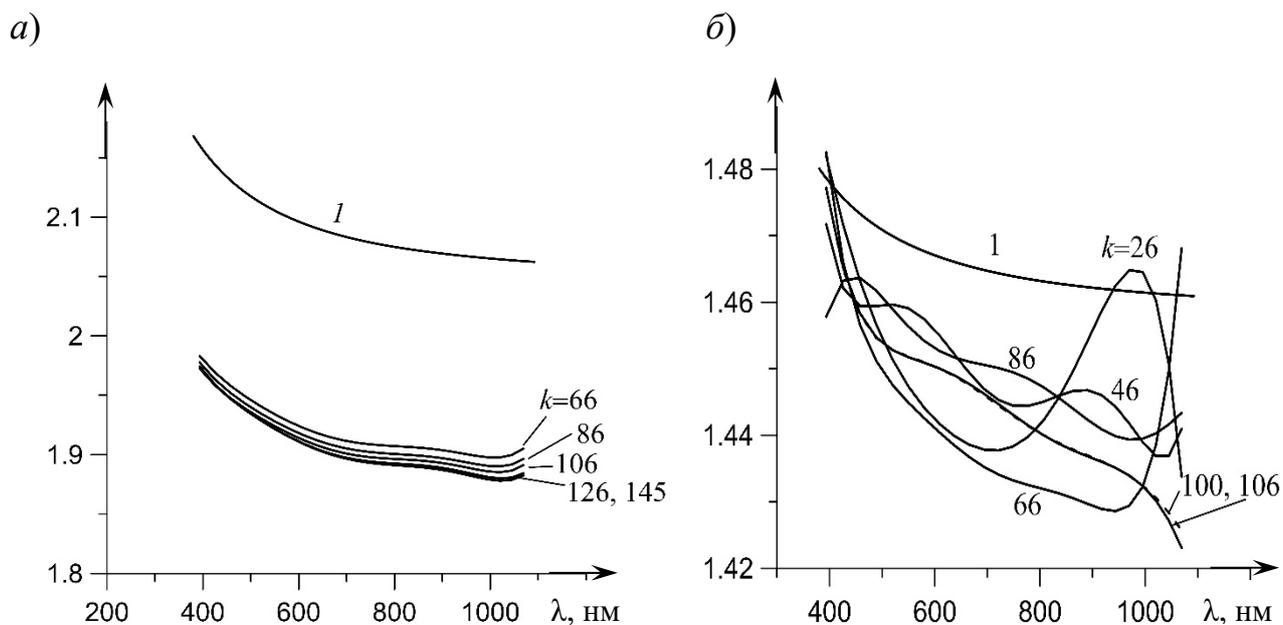


Рис. 4. Динамика восстановления спектров показателя преломления слоев ZrO_2 (а) и SiO_2 (б). Кривые 1 – литературные данные для дисперсии объемных материалов

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сотская, Л. И. Задача спектрофотометрии растущего слоя / Л. И. Сотская, Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 21–22 апр. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 417–418.

2. Спектроскопия слоев на плоскопараллельных подложках / А. Б. Сотский [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128, № 8. – С. 1133–1143.

E-mail: li_sotskaya@tut.by, kenni_mark@bk.ru, ab_sotsky@mail.ru, krivetski@essentoptics.com, ni_staskov@mail.ru.

УДК 535.016:543.4

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СУЛЬФИДА ИНДИЯ***Н. И. СТАСЬКОВ¹, С. О. ПАРАШКОВ², Е. А. ЧУДАКОВ¹***¹Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова²Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 535.016:543.4

EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THIN INDIUM SULPHIDE FILMS***N. I. STASKOV, S. O. PARASHKOV, E. A. CHUDAKOV***

Аннотация. Исследованы оптические свойства пленок сульфида индия (In₂S₃), отожженных при температурах 350 °С и 450 °С, на подложке из известково-натриевого стекла. Пленки получены методом высокочастотного магнетронного распыления (RFMS). Оптические характеристики и толщины пленок определены методами спектральной эллипсометрии (SE) и спектрофотометрии отражения и пропускания (SRT). Обработка спектров выполнена программным обеспечением DeltaPsi2 для трехслойной пленки с дисперсионной функцией Тауца – Лоренца (TL) и методом наименьших квадратов при задании спектра комплексного показателя преломления однослойной пленки в виде полиномов Лагранжа – Чебышева.

Ключевые слова: оптические характеристики сульфида индия, спектральная эллипсометрия, спектрофотометрия, тонкие пленки, температура отжига, трехслойная электродинамическая модель.

Abstract. Researched the optical properties of indium sulfide (In₂S₃) films annealed at 350 °C and 450 °C on a soda-lime glass substrate. The films were obtained by high-frequency magnetron sputtering (RFMS). Optical characteristics and film thicknesses were determined by spectral ellipsometry (SE) and reflection and transmission spectrophotometry (SRT). The spectra were processed using the DeltaPsi2 software for a three-layer film with the Tauc – Lorentz (TL) dispersion function and the least squares method when specifying the spectrum of the complex refractive index of a single-layer film in the form of Lagrange – Chebyshev polynomials.

Keywords: optical characteristics of indium sulfide, spectral ellipsometry, spectrophotometry, thin films, annealing temperature, three-layer electrodynamic model.

Для производства недорогой и чистой энергии актуален поиск нетоксичных материалов, которые могут использоваться при разработке тонкопленочных фотоэлектрических модулей. Высокоэффективные элементы таких модулей обычно включают буферные слои CdS *n*-типа. Хорошо известно, что толщина и оптические свойства буферного слоя в устройствах тонкопленочных солнечных элементов играют важную роль [1]. Метод химического осаждения из ванны (CBD) известен как лучший способ получения тонких пленок CdS для применения в тонкопленочных солнечных элементах [2, 3]. Однако жидкие отходы, получаемые в результате метода CBD, содержат токсичные Cd, S и аммиак. Замена CdS материалом с большей шириной запрещенной зоны увеличивает пропускание света в коротковолновом диапазоне длин волн [4].

Была предпринята замена буферного слоя CdS другими материалами, не содержащими кадмий. В этом контексте полупроводниковый In_2S_3 n -типа рассматривается как хорошая альтернатива CdS. Кристаллическая структура In_2S_3 не разрушается при нагревании от $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $420\text{ }^\circ\text{C}$.

Тонкие пленки In_2S_3 нанесены на подложки известково-натриевого стекла (SLG) ($D = 1,2\text{ мм}$) с использованием техники RFMS в системе конфокального магнетронного распыления (Nanovak, NVTS500).

Спектры T подложек SLG и пленок на этих подложках измеряли (рис. 1, луч 1,) с помощью спектрометра Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм с шагом 1 нм при угле падения $\theta = 0^\circ$. Спектры T_s , T_p (луч 3) и R_s , R_p (лучи 2 и 4) подложек SLG и пленок на этих подложках измеряли на спектрометре PHOTON RT (EssentOptics, Беларусь) в диапазоне длин волн от 250 до 826 нм с шагом 1 нм при угле $\theta = 10^\circ$. Углы ψ и Δ всех образцов измеряли (луч 2) на эллипсометре UVISEL2 (HORIBA, Франция) при углах падения 55° (SLG), 60° , 65° и 70° (In_2S_3 -SLG) в диапазоне энергий фотонов от 6 эВ (206,667 нм) до 1,5 эВ (826,667 нм) с шагом 0,01 эВ.

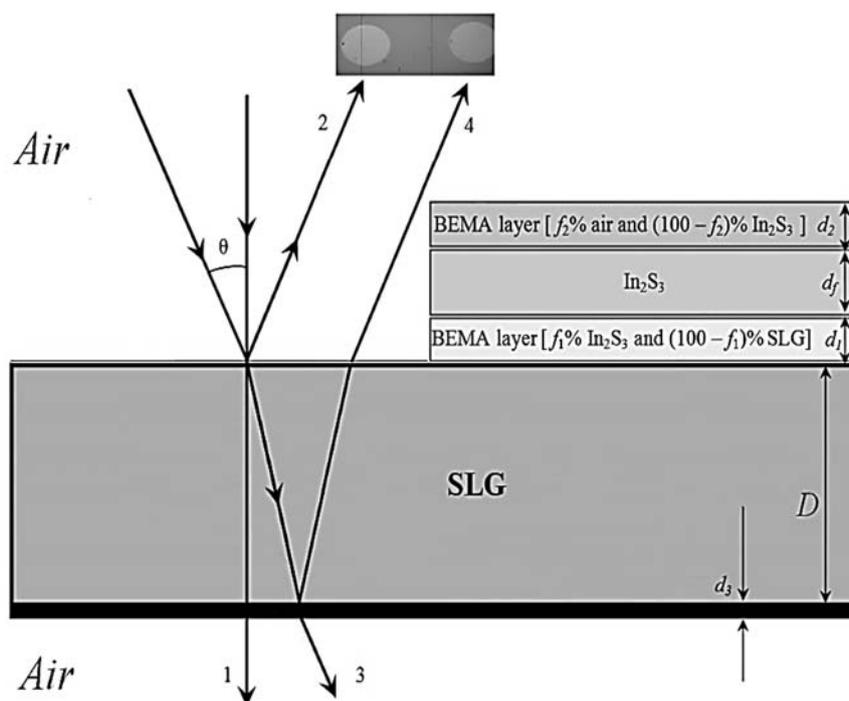


Рис. 1. Схемы измерения спектров T , R , ψ , Δ пленки с поверхностным и переходным слоями Бруггемана на подложке

Все оптические измерения проводили при комнатной температуре. При малых углах θ широкие пучки отраженных лучей 2 и 4 (спектрометр PHOTON RT) практически не разделяются миллиметровой плоскопараллельной пластиной. Разделение узких пучков 2 и 4 (фото над лучами) достигается при использовании метода SE при углах $\theta > 50^\circ$.

На рис. 2 представлены 3D-АСМ-изображения тонких пленок In_2S_3 после осаждения и термического отжига. Площадь сканирования – $3 \times 3\text{ мкм}$. Величина

среднеквадратичной шероховатости R_{rms} исходной пленки – 0,33 нм. Увеличение R_{rms} от 0,97 до 1,99 нм при увеличении температуры от 350 °С до 450 °С вызвано изменениями структуры пленок. На их поверхности появляются небольшие кластеры. При повышении температуры отжига количество кластеров на поверхности пленки увеличилось. Именно эти кластеры являются причиной шероховатости пленок.

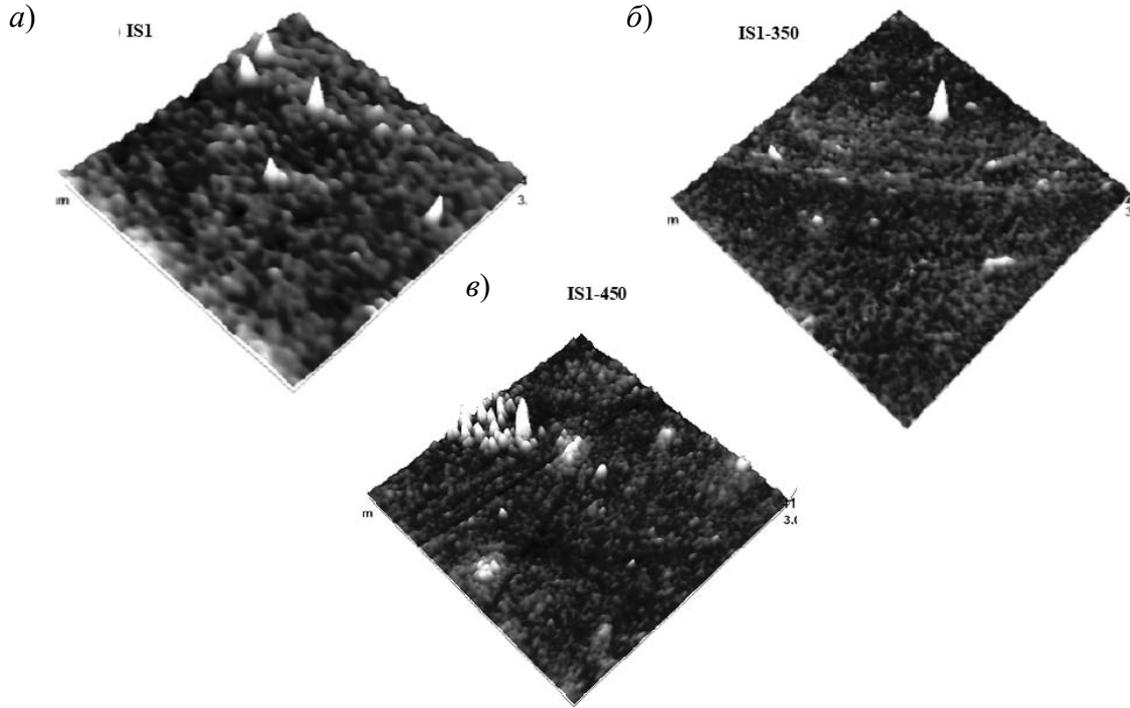


Рис. 2. 3D-АСМ-изображения после осаждения (а), термического отжига при 350 °С (б) и 450 °С (в) пленок In_2S_3

Эллипсометрический анализ пленок на известной подложке с помощью программного обеспечения DeltaPsi2 упрощается при выборе измерений по лучу 2 (см. рис. 1). В этом случае нет необходимости учитывать толщину подложки и параметры оловянного слоя d_4 . Расчеты оптических и геометрических параметров пленок In_2S_3 , эффективных f_1 , f_2 поверхностных и переходных слоев выполнили для трехслойной модели (см. рис. 1) и дисперсионной функции TL :

$$\varepsilon_i(E) = \begin{cases} \frac{1}{E} \frac{AE_0C(E - E_g)^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + C^2E^2}, & (E > E_g) \\ 0, & (E \leq E_g) \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r(E) = n^2(E) - k^2(E) = \varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} P \int_{E_g}^{\infty} \frac{\xi \varepsilon_i(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi. \quad (2)$$

В таком случае определили десять неизвестных параметров d_1 , f_1 , d_f , d_2 , f_2 , E_g , ε_∞ , A , E_0 , C (табл. 1). По эллипсометрическим данным $f_1 = 100\%$. Это указывает, что переходным слоем «пленка – подложка» можно пренебречь, а толщина пленки определяется как сумма d_1 и d_f . Известно, что толщина нарушенного слоя на стекле SLG ($D = 1,6$ мм) около 1 нм. Для всех образцов часть воздуха в поверхностных слоях пленок много больше части In_2S_3 . Поэтому подгоночный параметр d_2 не может характеризовать шероховатость поверхности пленок. С увеличением температуры отжига увеличиваются параметр χ^2 и абсолютная погрешность определения оптических и геометрических характеристик пленок.

Табл. 1. Параметры модели пленок In_2S_3 и функции TL

Образец	d_1 , нм	f_1 , %	d_f , нм	d_2 , нм	f_2 , %	E_g , эВ	ε_∞	A , эВ	E_0 , эВ	C , эВ	χ^2
IS1	$20,1 \pm 7,6$	100	$98,3 \pm 7,6$	$42,5 \pm 1,1$	$94,3 \pm 0,15$	$1,81 \pm 0,01$	$2,77 \pm 0,03$	$41,64 \pm 0,88$	$5,03 \pm 0,03$	$5,08 \pm 0,08$	2,31
IS1-35	$20,5 \pm 14,2$	100	$102,9 \pm 14,2$	$51,5 \pm 1,5$	$95,1 \pm 0,1$	$2,03 \pm 0,02$	$2,76 \pm 0,04$	$49,5 \pm 1,3$	$4,84 \pm 0,04$	$4,34 \pm 0,08$	5,60
IS1-45	$12,0 \pm 10,1$	100	$106,0 \pm 10,1$	$37,9 \pm 2,2$	$93,1 \pm 0,4$	$2,03 \pm 0,01$	$2,14 \pm 0,09$	$72 \pm 2,2$	$4,92 \pm 0,06$	$4,53 \pm 0,1$	7,12

В качестве примера на рис. 3 приведены эллипсометрические характеристики образца IS1-350.

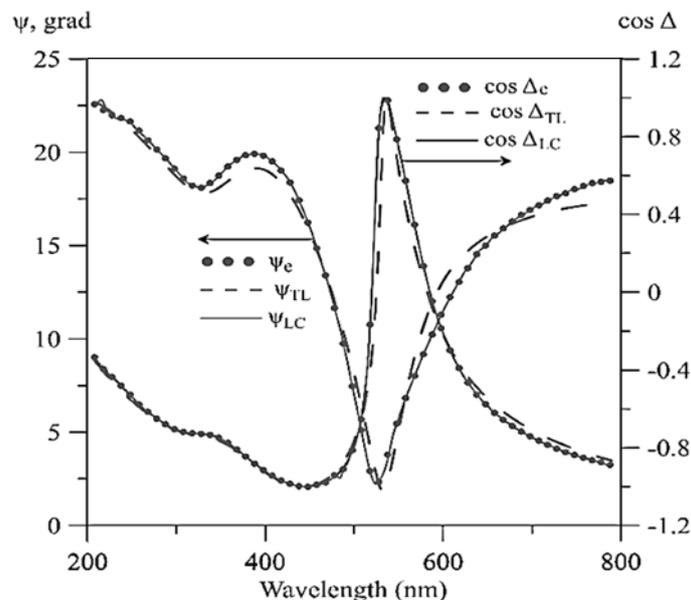


Рис. 3. Измеренные ψ_e , $\cos \Delta_e$ и рассчитанные ψ_{TL} , $\cos \Delta_{TL}$ ($\theta = 60^\circ$) эллипсометрические характеристики пленки IS1-350

Существенное отличие измеренных ψ_e , $\cos \Delta_e$ от рассчитанных ψ_{TL} , $\cos \Delta_{TL}$ наблюдается в области интерференционных экстремумов и в области

прозрачности пленок, которая определяется функцией TL . Это отличие может быть вызвано структурными изменениями в пленках, которые приводят к более сложной дисперсионной зависимости оптических характеристик в сравнении с функциями (1) и (2). По $\psi_e, \cos \Delta_e (\theta = 60^\circ)$ с использованием специально разработанного алгоритма решения обратной задачи SE рассчитали d_f, n_f, k_f однослойной пленки на плоскопараллельной поглощающей подложке SLG и эллипсометрические параметры $\psi_{LC}, \cos \Delta_{LC}$ (см. рис. 3).

Увеличение температуры отжига пленок In_2S_3 приводит к уменьшению концентрации пустот f_2 и к соответствующему увеличению концентрации In_2S_3 ($100 - f_2$) (см. табл. 1) в их приповерхностных слоях. Поэтому увеличивается шероховатость пленок R_{rms} . В то же время увеличиваются показатели преломления пленок (рис. 4). Например, на длине волны 632,8 нм n_f изменяется с 2,307 до 2,423, а на длине волны 700 нм n_f изменяется с 2,274 до 2,389. Показатель экстинкции пленок на длине волны 632,8 нм уменьшается от 0,019 до 0,004, а на длине волны 700 нм растет от 0,007 до 0,024 и уменьшается до 0,01. Увеличение n_f и уменьшение k_f приводят к увеличению R и уменьшению прозрачности пленок IS1-450 (рис. 5, а).

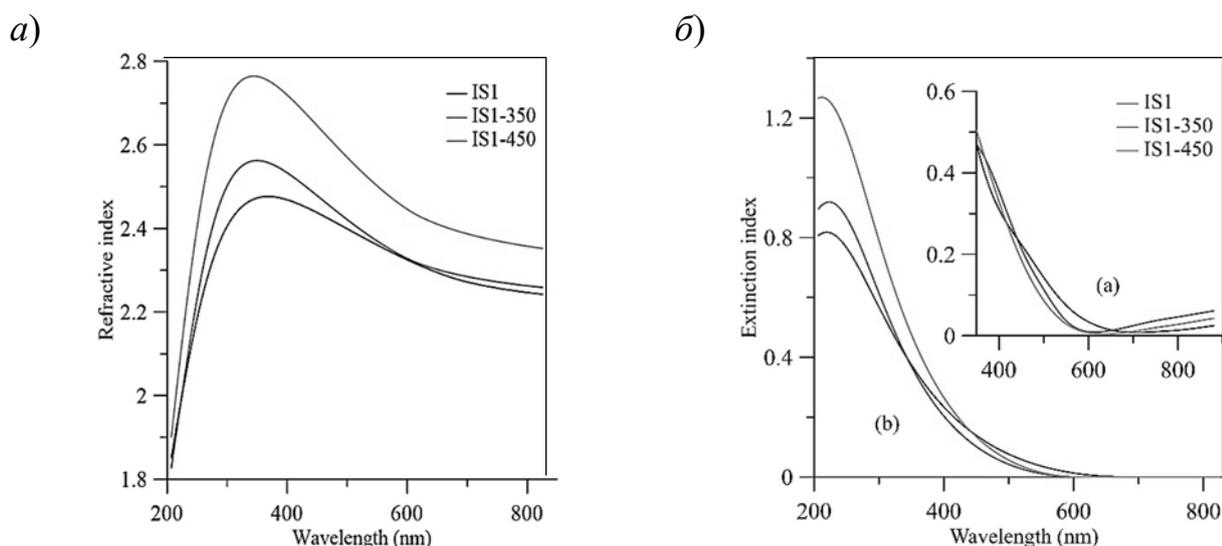


Рис. 4. Показатели преломления и экстинкции пленок In_2S_3

На рис. 5, б представлена функция Лоренц – Лоренца $(n_f^2 - 1) / (n_f^2 + 2)$ показателя преломления пленок на длинах волн 632,8 и 700 нм. Эта зависимость соответствует линейной функции ρ от n_f . Следовательно, при увеличении температуры отжига увеличивается плотность и уменьшается толщина пленок.

Дисперсионная формула Тауца – Лоренца в приближении трехслойной электродинамической модели пленки на поглощающей подложке позволяет определить показатели преломления пленок In_2S_3 . Толщина пленок, определенная методами SE и SRT, уменьшается из-за их уплотнения при увеличении температуры отжига. Спектры показателя экстинкции имеют минимум, длина

волны которого уменьшается с ростом температуры отжига пленок. Это приводит к увеличению показателя преломления, увеличению отражательной способности и уменьшению прозрачности пленок. Ширина запрещенной зоны пленок увеличивается с повышением температуры отжига от 1,79 до 2,03 эВ, энергия Урбаха уменьшается от 0,165 до 0,127 эВ.

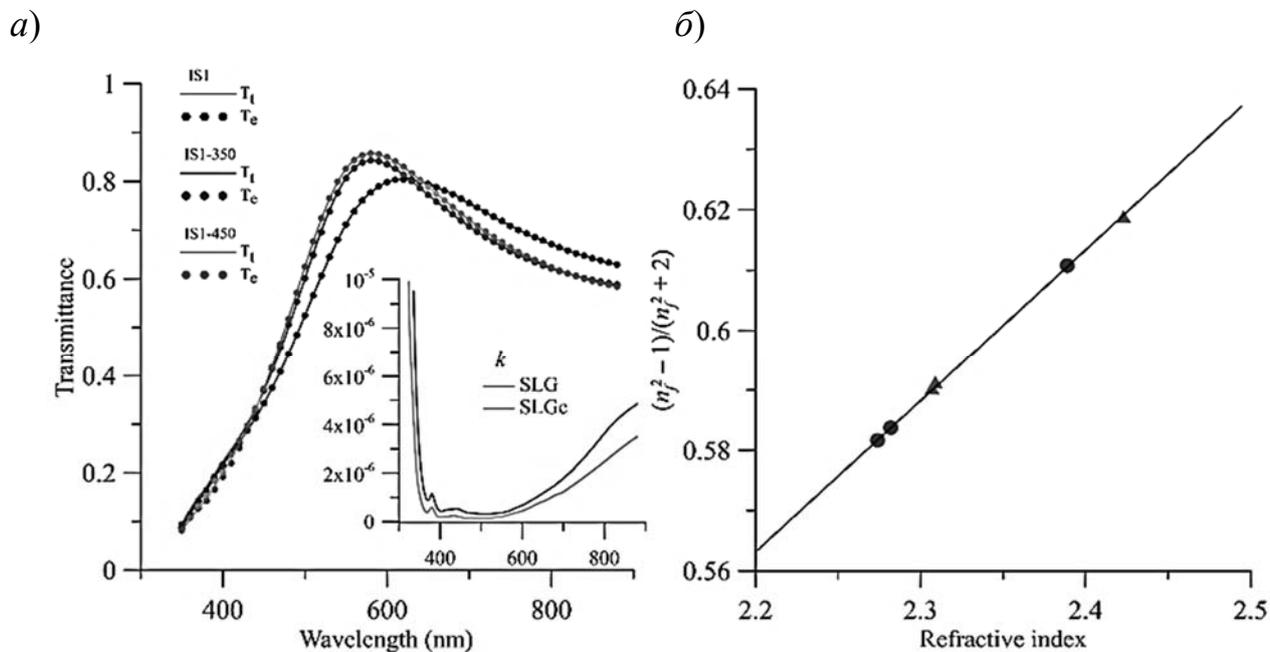


Рис. 5. Измеренные и рассчитанные при $\theta = 0^\circ$ пропускательные способности пленок и показатели экстинкции стекол SLG (а); функция Лоренц – Лоренца показателя преломления пленок In_2S_3 (б)

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. In situ low-temperature chemical bath deposition of cds thin films without thickness limitation: structural and optical properties / M. Ouafi [et al.] // International Journal of Photoenergy. – 2018. – P. 1–12.
2. Record efficiency for thin-film polycrystalline solar cells up to 22,9 % achieved by Cs-treated $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{Se}, \text{S})_2$ / T. Kato [et al.] // Ieee J Photovolt. – 2018. – Vol. 9. – P. 325–330.
3. $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ solar cells with over 10 % power conversion efficiency enabled by heterojunction heat treatment / C. Yan [et al.] // Nat Energy. – 2018. – Vol. 3. – P. 764–772.
4. Enhancement of photovoltaic performances of $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ solar cell through combination of heat-light soaking and light soaking processes / J. Chantana [et al.] // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2018. – Vol. 26. – P. 127–134.

УДК 620.179.147

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В СОРТОВЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ

И. В. ТЕРЕХИН, Е. А. СЛАВИНСКАЯ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 620.179.147

PULSED EDDY CURRENT MOLTEN METAL LEVEL SENSOR FOR BILLET CASTER

I. V. TEREKHIN, E. A. SLAVINSKAYA

Аннотация. Представлен импульсный вихретоковый датчик для определения уровня жидкого металла в сортовых кристаллизаторах в процессе непрерывной разливки. Описаны технологические условия проведения электромагнитного контроля уровня в кристаллизаторах, приведены основные проблемы при гармоническом возбуждении и пути их решения при импульсном возбуждении преобразователя. В промышленных условиях подтверждена работоспособность предложенных решений. За счет свойств импульсного возбуждения удается устранить дрейфы, а также влияние стальной рубашки кристаллизатора на измерения уровня металла.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, импульсное возбуждение, непрерывная разливка стали, контроль уровня металла.

Abstract. The article deals with the pulsed eddy current sensor for determining molten steel level in a mold in the continuous casting process. The technological conditions for electromagnetic testing of steel level in a mold are described. The main problems of conventional excitation method and possible solutions by using pulsed excitation are given. The proposed solutions efficiency has been confirmed in industrial conditions. The study reports that pulsed excitation allows to eliminate drifts and influence of steel mold jacket on the level measurement quality.

Keywords: eddy current testing, pulsed excitation, continuous steel casting, metal level control.

Введение. Технология непрерывной разливки стали повсеместно используется на металлургических предприятиях в России. Одним из ключевых элементов машины непрерывного литья заготовок является кристаллизатор. Его рабочая часть в виде медной сквозной гильзы предназначена для приема жидкого металла и формирования заготовки заданного сечения (рис. 1).

Для обеспечения высокого качества заготовки требуется контролировать и поддерживать стабильный уровень металла в гильзе кристаллизатора. Информацию о текущем положении уровня регистрируют с помощью, в частности, электромагнитных датчиков. Электромагнитные датчики уровня регистрируют изменение поля вихревых токов, наводимых в объекте контроля при появлении металла. Первичное электромагнитное поле датчика обычно создается с помощью синусоидального или импульсного возбуждения.

При вихретоковом контроле уровня в кристаллизаторах малого сечения, как правило, используют тепловой способ определения уровня металла. При заполнении металлом гильза нагревается неравномерно. Выше мениска ее температура заметно ниже по сравнению с нижней частью. Распределение температуры следует за положением мениска. Поэтому, контролируя его, можно определять уровень, измеряя электропроводность гильзы в нескольких точках по высоте гильзы с помощью вихретокового преобразователя.

К основным требованиям к датчику относится стабильность показаний в условиях длительной непрерывной работы (до недели), часто под влиянием мощного переменного электромагнитного поля устройства для перемешивания стали (ЭМП). На стабильность показаний влияет ряд факторов [1]. Во-первых, объект контроля является многослойным, при этом магнитная проницаемость стальной рубашки кристаллизатора, находящейся между преобразователем и гильзой, циклически изменяется под влиянием поля ЭМП. На рис. 2 показано, как при этом меняется модуль вносимого напряжения $U_{вн}$ относительно полезного сигнала (1 мВ): помеха от ЭМП соизмерима с полезным сигналом. Во-вторых, возникновение дрейфа сигнала датчика из-за изменений условий контроля – давление, температура окружающей среды, собственный нагрев датчика – эти факторы влияют на трансформаторный сигнал преобразователя. В-третьих, особенности монтажа датчика предполагают ограниченность пространства под чувствительный элемент, габариты которого составляют $200 \times 40 \times 50$ мм, и значительное расстояние до объекта контроля – 15...30 мм.

Перечисленные трудности могут быть устранены несколькими путями. При гармоническом возбуждении для снижения дрейфов сигнала датчика применяется дифференциальный способ включения измерительных обмоток, а также амплитудно-фазовый метод отстройки от мешающих факторов. Влияние стальной рубашки кристаллизатора компенсируют путем выреза в ней отверстия под чувствительный элемент. Приведенные способы ведут к увеличению габаритов преобразователя и/или к значительной модификации кристаллизатора. Переход от гармонического возбуждения к импульсному позволяет упростить решение описанной проблемы.

Импульсный способ возбуждения. Импульсное возбуждение заключается в подаче на обмотку возбуждения напряжения прямоугольной формы [2–4]. С помощью измерительной обмотки регистрируется зависимость ЭДС от времени. В первый момент времени сигнал содержит только трансформаторную ЭДС. Далее на сигнал оказывает влияние воздушный зазор между

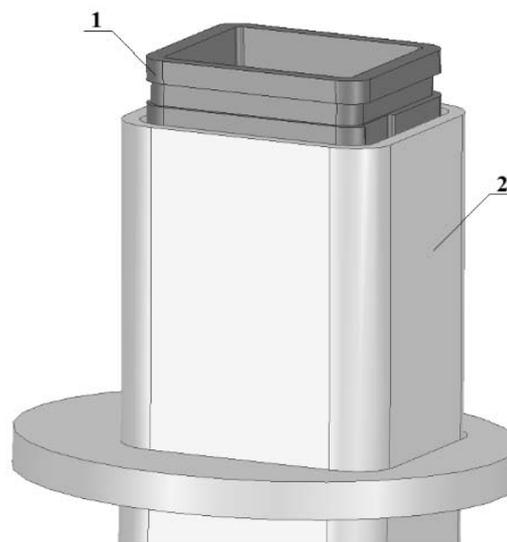


Рис. 1. Кристаллизатор: 1 – медная гильза; 2 – стальная рубашка

преобразователем и поверхностью контролируемого объекта. Затем послойно приходит информация об объекте контроля начиная с верхних слоев. Постоянная времени переходного процесса прямо пропорциональна электропроводности и магнитной проницаемости объекта контроля. Таким образом, появляется возможность разделить во времени трансформаторный сигнал и информативный сигнал от контролируемого объекта, а также проанализировать информацию об объекте послойно. При этом уходит необходимость в дифференциальном включении измерительных обмоток, что позволяет сделать датчик более компактным и при этом не имеющим дрейфов, связанных с трансформаторной ЭДС.

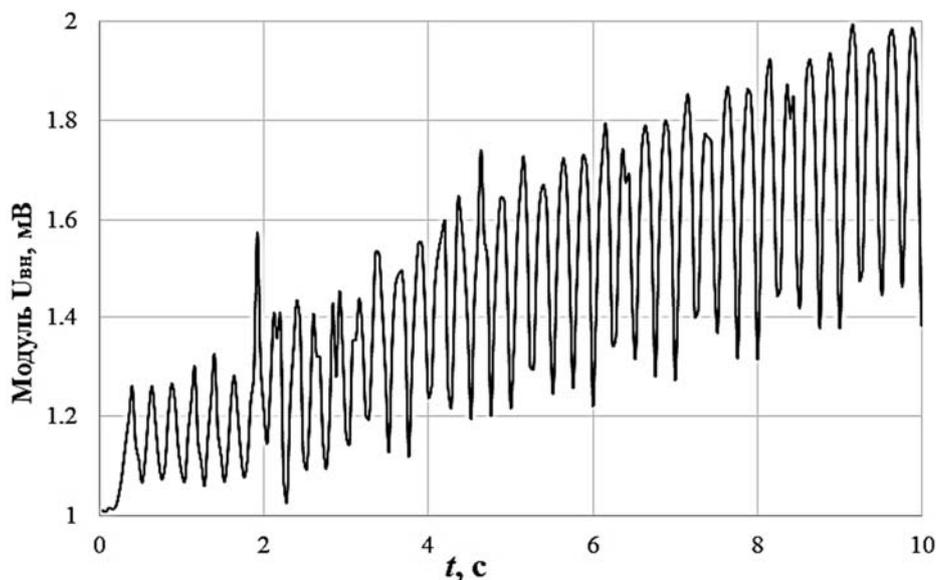


Рис. 2. Зависимость модуля $U_{вн}$ от времени при включении ЭМП

Ранее рассматривалась задача снижения чувствительности датчика уровня металла к изменению магнитной проницаемости рубашки [1]. В рамках решения этой задачи проводились исследования импульсного возбуждения на примере двухслойного объекта контроля [5]. На рис. 3 приведены временные зависимости магнитного потока, которые иллюстрируют слабое влияние верхнего слоя $\sigma_{п}$ на сигнал от нижнего слоя $\sigma_{осн}$ контролируемого объекта в случае $\sigma_{п} \ll \sigma_{осн}$ (кривая $\sigma_{п} = 1$ МСм/м, $\sigma_{осн} = 38$ МСм/м) спустя уже 1 %...5 % от постоянной времени переходного процесса. Таким образом, при импульсном возбуждении возможен независимый контроль свойств слоев объекта.

Практическая реализация. С учетом свойств импульсного возбуждения был разработан датчик уровня металла, модель которого представлена на рис. 4. Датчик состоит из двух печатных плат – протяженной обмотки возбуждения и набора измерительных обмоток. Датчик устанавливается на рубашку кристаллизатора из слабомагнитной стали ($\sigma = 1$ МСм/м, $\mu = 1 \dots 1,2$) и предназначен для регистрации вносимого напряжения от нагрева медной стенки кристаллизатора.

Полный сигнал вихретокового датчика уровня металла условно можно разделить на несколько составляющих, определяемых рядом факторов: трансформаторная ЭДС, электропроводность медной стенки и стальная рубашка. На

рис. 5 показаны эти составляющие за период возбуждения, за нулевой отсчет времени выбран момент по переднему фронту тока.

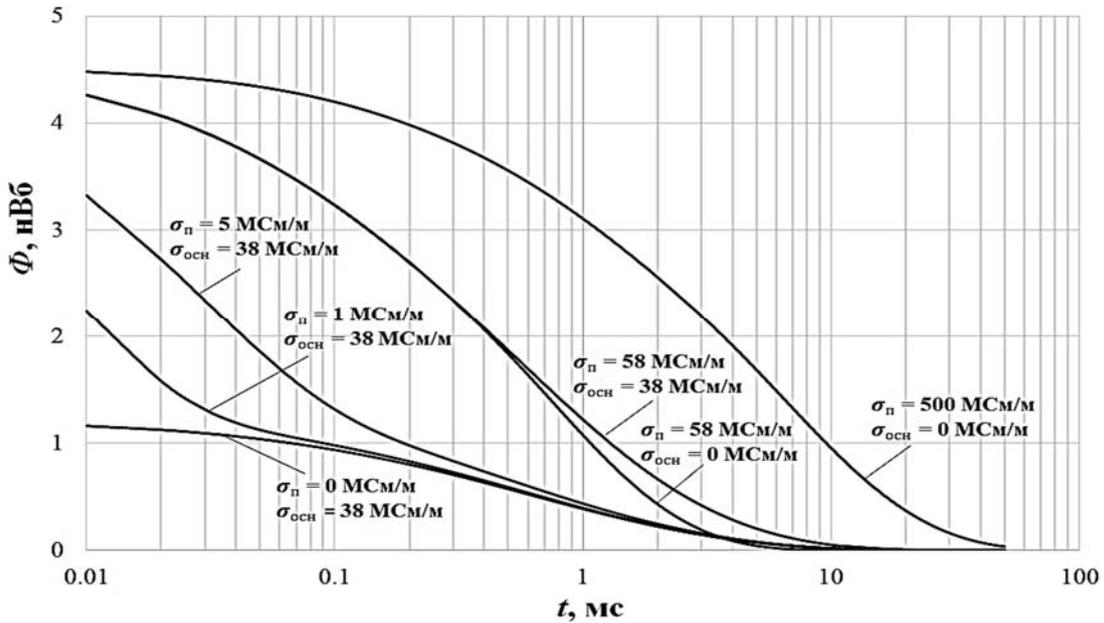


Рис. 3. Зависимости магнитного потока от времени [5]

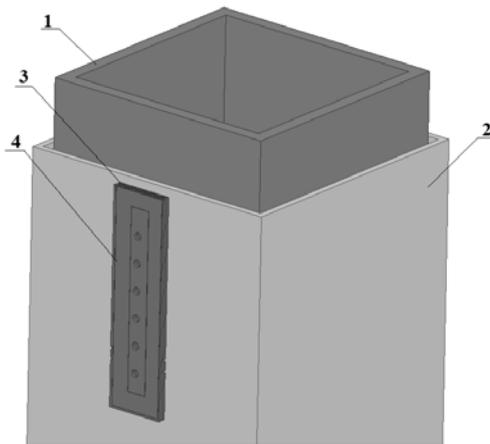


Рис. 4. Модель датчика: 1 – медная гильза; 2 – рубашка; 3 – плата измерительных обмоток; 4 – плата обмотки возбуждения

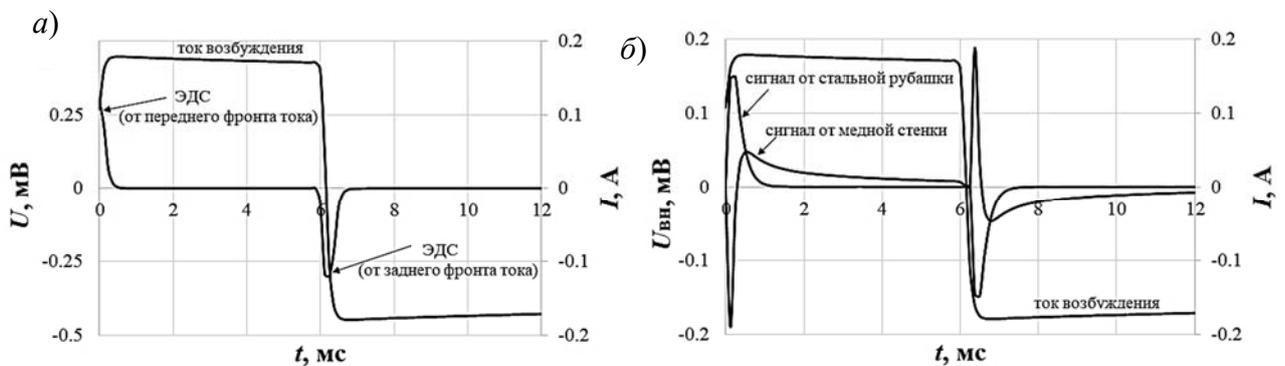


Рис. 5. Вихретоковые сигналы при импульсном возбуждении: *a* – на воздухе; *б* – вносимые сигналы от рубашки и медной стенки

Постоянная времени переходного вихретокового процесса в стальной рубашке не превышает 0,3 мс, в то время как длительность переходного процесса в меди на порядок выше – 5 мс. Такое соотношение позволяет снизить влияние процессов в рубашке при исключении из обработки начального интервала времени после формирования импульса возбуждения. При таком подходе не исключается частотная фильтрация другого мешающего фактора – ЭДС в измерительных обмотках от поля ЭМП. После исключения интервала времени влияния рубашки на каждом полупериоде возбуждения сигнал проходит полосовую фильтрацию и преобразование Фурье для выделения гармоник на частоте возбуждения датчика.

Функциональность разработанного датчика уровня с импульсным возбуждением была подтверждена в промышленных условиях. На рис. 6 показано, как меняются временные зависимости модуля $U_{\text{вн}}$ при включении ЭМП. Эффект от поля ЭМП остается, т. к. поле возбуждения зависит от магнитной проницаемости рубашки. Тем не менее его влияние синхронно во всех обмотках, а величина помехи составляет малую долю от полезного сигнала. В совокупности в результате измерений импульсным методом помеха от ЭМП снижается в 5 раз и не влияет на точность измерения уровня металла.

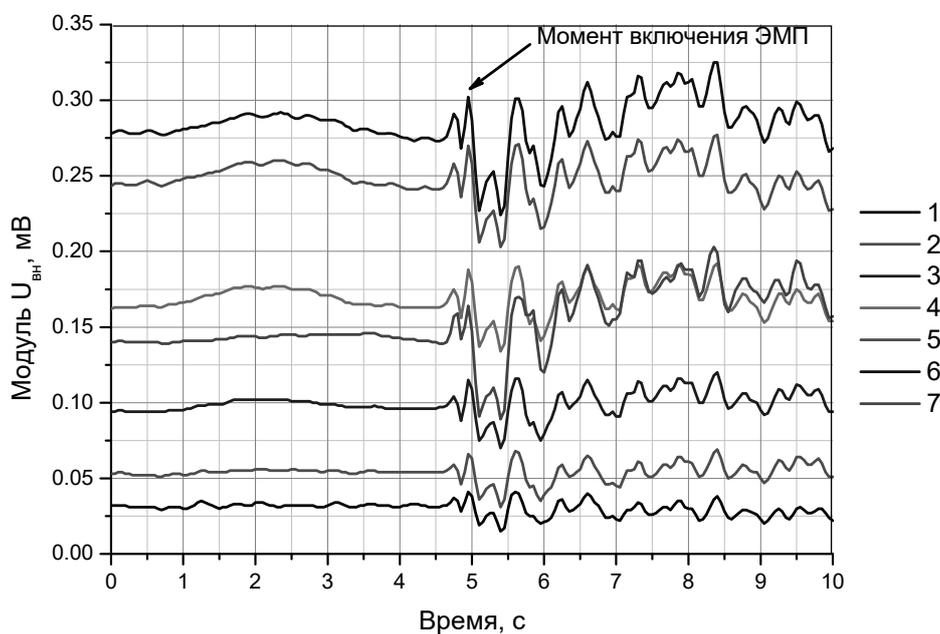


Рис. 6. Зависимость модуля $U_{\text{вн}}$ от времени для всех измерительных обмоток

Заключение. В работе рассмотрен новый электромагнитный датчик с импульсным возбуждением, предназначенный для контроля уровня металла в сортовых кристаллизаторах при непрерывной разливке. Показаны основные преимущества применения импульсного возбуждения при проведении контроля

в сложных технологических условиях. Представленное техническое решение позволяет устранить влияние ряда мешающих факторов, таких как трансформаторный сигнал и его дрейф, сигнал от рубашки, магнитная проницаемость которой меняется внешним полем, при этом заметно сокращаются габариты датчика и улучшается технологичность его изготовления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савин, И. С.** Снижение погрешности от ЭМП при измерении уровня расплава вихретоковым методом / И. С. Савин, И. В. Терехин // Датчики и системы. – 2017. – № 6. – С. 42–49.
2. **Sophian, A.** Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review / A. Sophian, G. Tian, M. Fan // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 30. – P. 500–514.
3. **Cheng, C. T.** Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy current measurements / C. T. Cheng, J. H. Rose, J. C. Moulder // Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67. – P. 3965–3972.
4. Thickness measurement of multi-layer conductive coatings using multifrequency eddy current techniques / D. Zhang [et al.] // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2016. – Vol. 31. – P. 191–208.
5. **Терехин, И. В.** Контроль удельной электропроводности двухслойных немагнитных объектов импульсным вихретоковым методом / И. В. Терехин, Е. А. Славинская // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 30–36.

E-mail: terekhin.iv@mail.ru, slavinskayacatherine@yandex.ru.

УДК 681.7

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПНЕВМОДАТЧИКА РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ

В. А. ТРЕТЬЯКОВА, А. А. АФАНАСЬЕВ, В. Ф. ГОГОЛИНСКИЙ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 681.7

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SECONDARY MEASURING CONVERTER FOR A PNEUMATIC SENSOR OF DIMENSIONAL CONTROL

V. A. TRETYAKOVA, A. A. AFANASIEV, V. F. GOGOLINSKY

Аннотация. Разработаны конструкции емкостного измерительного и емкостного эталонного преобразователей и электрическая структурная схема вторичного измерительного преобразователя (ВИП) для совместного использования с пневмодатчиком с целью бесконтактного технологического контроля толщины пленки. Математическое моделирование работы ВИП показало возможность измерения толщины пленки с дискретностью до 0,1 мкм.

Ключевые слова: синтетическая пленка, толщина, измерение, пневмодатчик, емкостный датчик, электронный блок, моделирование.

Abstract. The designs of the capacitive measuring and capacitive reference transducers and the electrical block diagram of the secondary measuring transducer (SMT) for joint use with a pneumatic sensor for the purpose of non-contact technological control of the film thickness have been developed. Mathematical modeling of the operation of the SMT showed the possibility of measuring the film thickness with a resolution of up to 0,1 μm .

Key words: synthetic film, thickness, measurement, pneumatic sensor, capacitive sensor, electronic unit, modeling.

Научно-технический прогресс и расширение производства практически всех видов пищевой продукции вывели тароупаковочную индустрию на уровень ведущих мировых отраслей, которая стремительно развивается. Упаковка из синтетических пленок позволяет сократить потери продукции, гарантировать ее качество, увеличить сроки ее хранения, обеспечить доставку потребителю. С ее помощью можно регулировать температуру продуктов в условиях микроволнового нагрева, создавать оптимальную газовую атмосферу внутри оболочки при хранении продуктов питания, направленно изменять состав продукта, используя биологически активные материалы с иммобилизованными ферментами.

Для изготовления подавляющего большинства тароупаковочной продукции используются полимерные материалы: однослойные газопроницаемые пленки для кратковременного хранения пищевых продуктов; многослойные барьерные пленки для долгосрочного хранения, включая упаковки с измененной газовой

атмосферой; полимерные пленки с активным наполнителем; «умные» упаковочные материалы.

Основным параметром пленок является их толщина. Отклонение этого параметра от нормативного значения приводит к значительным материальным и энергетическим потерям и увеличению себестоимости готовой продукции. Поэтому актуальной является задача контроля толщины пленки в процессе её производства, что обеспечивает оперативное управление технологическим процессом.

Для измерения толщин пленок используются механические, акустические, оптические, электрические, магнитные, вихретоковые и радиационные методы, в которых сравниваются параметры физических полей до и после их взаимодействия с объектом контроля. Данные методы основаны на различных физических принципах, позволяющих получить конечный информативный параметр в виде электрического сигнала, уровень которого коррелирует с толщиной объекта. Вышеперечисленные методы различаются по точности измерения, быстродействию, достоверности результатов, возможности автоматизации как собственно измерений, так и документирования их результатов и, что особенно важно для производителей, по стоимости практической реализации. Для производителей также важно делать замеры с высокой точностью и разрешающей способностью и в режиме реального времени [1]. Этим требованиям удовлетворяет метод замера аэродинамического сопротивления воздушного зазора между воздушным соплом и пленкой [2, 3]. Его недостатком является отсутствие электрического сигнала на выходе пневмодатчика. Для устранения этого недостатка конструкция пневмодатчика была усовершенствована путем добавления к нему вторичного измерительного преобразователя для преобразования неэлектрической измеряемой величины (толщины пленки) в электрическую (рис. 1).

Для вторичного преобразования первичного сигнала (линейного перемещения подвижного элемента пневмодатчика) в электрический сигнал используется преобразователь емкостного типа [4]. Он состоит из двух пластин, расположенных напротив друг друга и разделенных воздушным зазором (рис. 2).

К подвижному штоку 1 пневмодатчика жестко прикреплен нижний электрод 2 емкостного преобразователя. Его верхний электрод 3 крепится на стержне 4 на расстоянии d от нижнего электрода. На стержне 4 также закреплен эталонный емкостный преобразователь с неизменным зазором $d_э$ между электродами 5 и 6. Внутренние поверхности электродов покрыты тонким защитным слоем диэлектрика толщиной $h_{зсд} = 50 \cdot 10^{-6}$ м.

Электрическая емкость емкостных преобразователей описывается выражением

$$C = \frac{S}{\frac{d}{\varepsilon_{зсд}} + \frac{d - d_1}{\varepsilon_0}}, \quad (1)$$

где S – площадь электродов емкостных преобразователей, $S = 0,1023 \text{ м}^2$; d_1 – толщина защитного слоя диэлектрика, $d_1 = 2 h_{зсд}$; $\epsilon_{зсд}$ – относительная диэлектрическая проницаемость защитного слоя диэлектрика, $\epsilon_{зсд} = 2,28$; d – номинальное расстояние между электродами емкостного преобразователя, $d = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$.

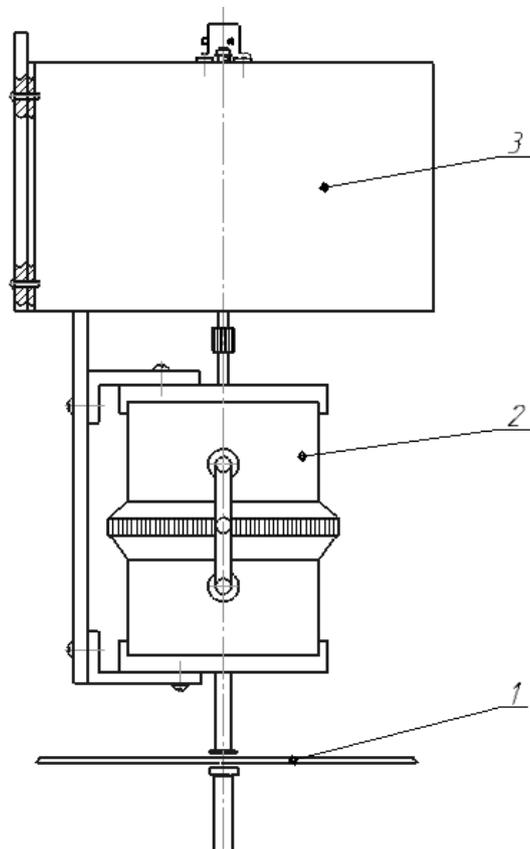


Рис. 1. Пневмоэлектрический преобразователь: 1 – объект контроля; 2 – первичный преобразователь (пневмодатчик); 3 – вторичный измерительный преобразователь

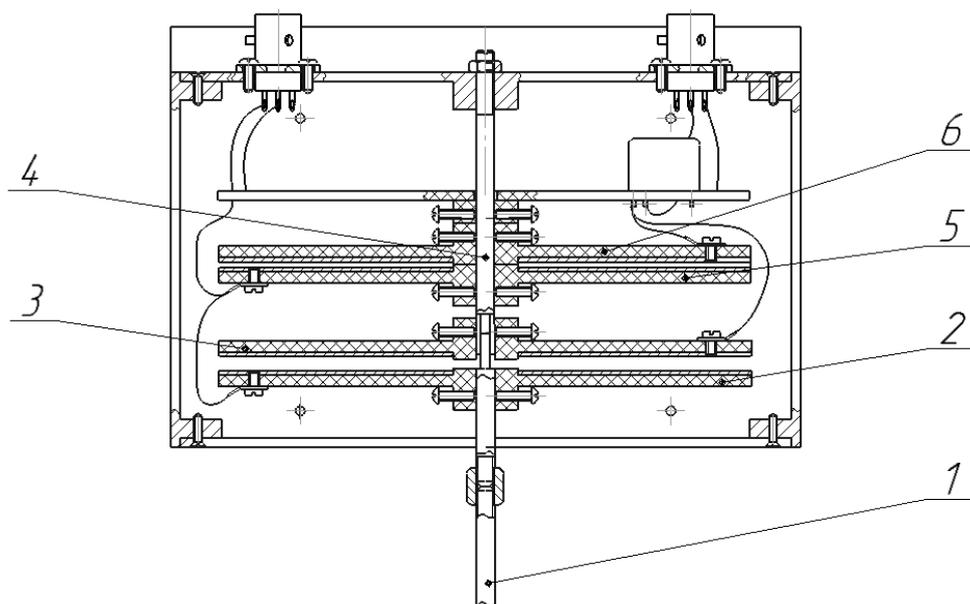


Рис. 2. Конструкция емкостных измерительного и эталонного преобразователей

Предположив, что отклонение толщины пленки от номинального значения будет лежать в диапазоне $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ м, определим максимальную и минимальную емкость измерительного преобразователя $C_{ИП}$. При минимальном зазоре ($d_{\min} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м)

$$C_{ИП \max} = \frac{S}{\frac{d_{\min}}{\varepsilon_{зсд}} + \frac{d_{\min} - d_1}{\varepsilon_0}} = 166,5 \text{ пФ.} \quad (2)$$

При максимальном зазоре ($d_{\max} = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м)

$$C_{ИП \min} = \frac{S}{\frac{d_{\max}}{\varepsilon_{зсд}} + \frac{d_{\max} - d_1}{\varepsilon_0}} = 140,7 \text{ пФ.} \quad (3)$$

График зависимости емкости измерительного преобразователя от линейного перемещения штока пневмодатчика в заданном диапазоне значений имеет следующий вид (рис. 3).

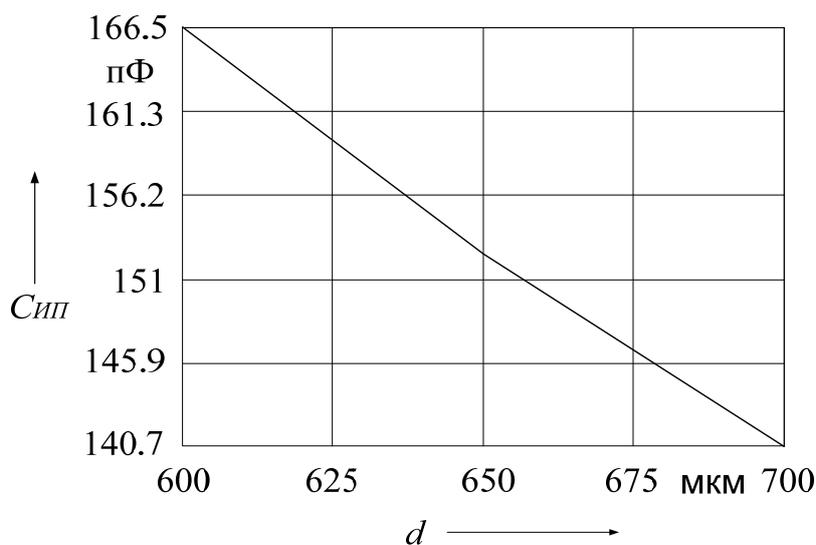


Рис. 3. График зависимости емкости измерительного преобразователя от линейного перемещения штока пневмодатчика

Результаты расчетов показывают, что электрические емкости преобразователей будут иметь малую величину, соизмеримую с паразитными емкостями, создаваемыми окружающими преобразователь объектами и соединительными проводами. Для уменьшения влияния дестабилизирующих факторов на результат измерения в состав вторичного преобразователя, кроме измерительного, включен эталонный емкостный преобразователь. Его емкость

$$C_9 = \frac{S}{\frac{d_9}{\epsilon_{зсд}} + \frac{d_9 - d_1}{\epsilon_0}} = 156,6 \text{ пФ.} \quad (4)$$

где d_9 – номинальный зазор между обкладками измерительного емкостного преобразователя, $d_9 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Для получения электрического измерительного сигнала разработана структурная схема электронного блока вторичного измерительного преобразователя (ВИП) [5] (рис. 4).

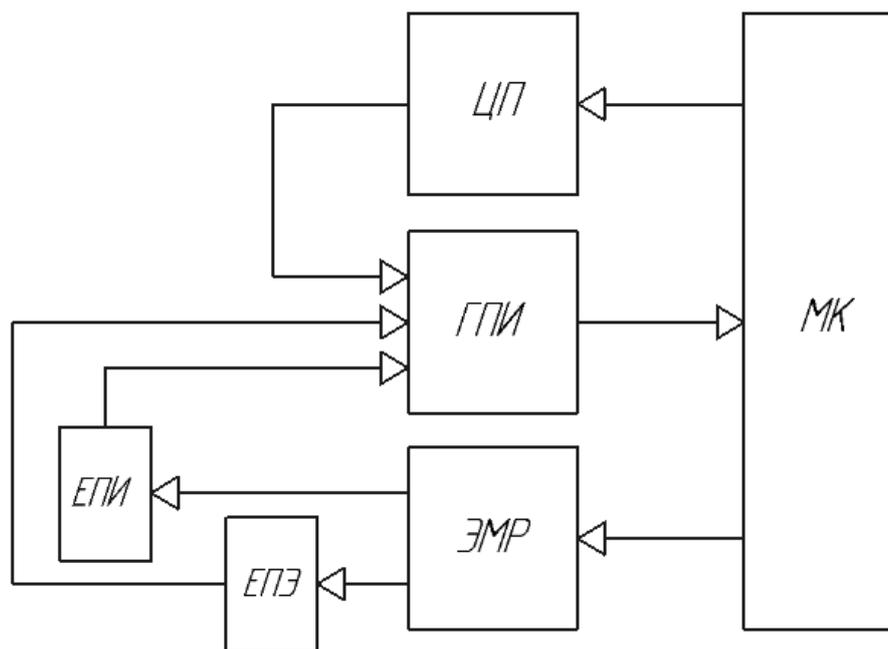


Рис. 4. Структурная схема ВИП

В его состав входят генератор прямоугольных импульсов *ГПИ*, цифровой потенциометр *ЦП*, электромагнитное реле *ЭМР*, емкостный преобразователь измерительный *ЕПИ* и емкостный преобразователь эталонный *ЕПЭ*. Управление работой ВИП осуществляется программно с использованием микроконтроллера (*МК*). С помощью *ЭМР* осуществляется поочередное подключение *ЕПИ* и *ЕПЭ* к *ГПИ*. *ЦП* используется для программной подстройки частоты *ГПИ*.

Частота импульсов на выходе *ГПИ* при подключении к нему *ЕПИ*

$$F(C_{ин}) = \frac{1,44}{RC_{ин}}, \quad (5)$$

где R – сопротивление *ЦП*, кОм.

Зависимость частоты *ГПИ* от расстояния между электродами *ЕПИ* ($F_{ГПИ}(C_{ин}) = F(d)$) и, соответственно, от толщины пленки имеет следующий вид (рис. 5).

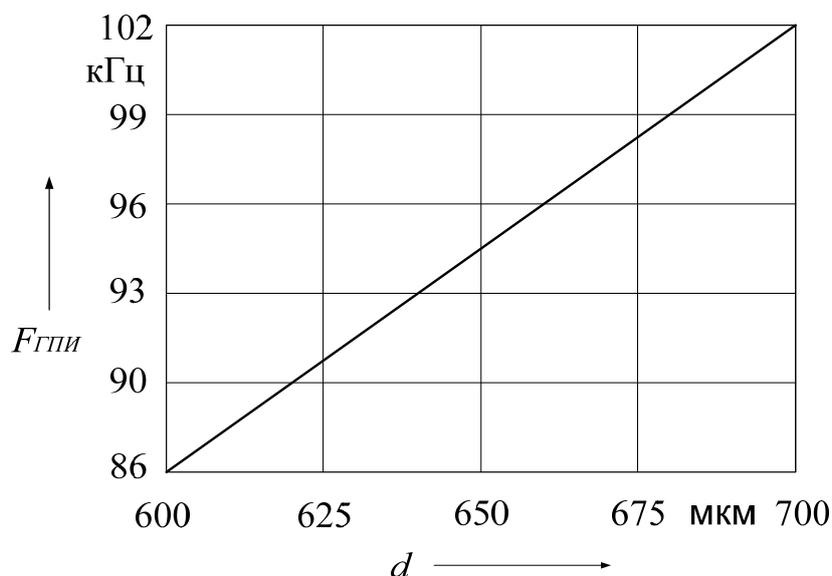


Рис. 5. Зависимость $F_{ГПИ}(C_{ИП})$ от параметра d

Полученные результаты моделирования работы ГПИ позволяют сделать оценку чувствительности спроектированного ВИП. Зная, что при изменении толщины пленки на 100 мкм $F_{ГПИ}(d)$ изменяется от 86478 до 102378 Гц, определим, насколько будет изменяться частота $\Delta F_{ГПИ}$ ВИП при изменении толщины пленки на 0,1 мкм:

$$\Delta F_{ГПИ} = (F(C_{ИП})_{\max} - F(C_{ИП})_{\min})/1000 = 15,9 \text{ Гц/мкм.}$$

Результаты моделирования показывают возможность измерения толщины пленки с дискретностью до 0,1 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ухарцева, И. Ю. Современная упаковка для пищевых продуктов / И. Ухарцева, Ж. Кадолич, Е. Цветкова // Тара и упаковка. – 2016. – № 2. – С. 18–23.
2. Пневматический способ измерения поперечных размеров движущегося изделия и устройство для его осуществления: а. с. SU 1453170 / В. Ф. Гоголинский, А. И. Потапов. – Оpubл. 23.01.1989.
3. Способ бесконтактного контроля профиля изделия и устройство для его осуществления: пат. ВУ 12407 / Е. И. Марукович, А. П. Марков, А. В. Коннов, В. Ф. Гоголинский, А. А. Александрович. – Оpubл. 30.06.2009.
4. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. – 390 с.
5. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.: ил.

УДК 621.382

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ
ЗОНД ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

*А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, А. Л. ЖАРИН, А. И. СВИСТУН, А. В. САМАРИНА,
К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, В. А. МИКИТЕВИЧ*

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.382

**A SMALL-SIZED SCANNING ELECTROMETRIC PROBE FOR
SEMICONDUCTOR AND NANOSTRUCTURED MATERIALS SURFACE
DEFECT CONTROL**

*A. K. TYAVLOVSKY, A. L. ZHARIN, A. I. SVISTUN, A. V. SAMARINA,
K. U. PANTSIALEYEU, U. A. MIKITSEVICH*

Аннотация. Рассмотрены вопросы проектирования и особенности конструкции малогабаритного сканирующего электрометрического зонда, предназначенного для неразрушающего контроля дефектов поверхности полупроводниковых и наноструктурированных материалов. Повышение отношения сигнал/шум при высокоскоростном сканировании обеспечивается использованием в схеме управления приводом вибрации электрометрического зонда интегрального драйвера пьезоэлектрического привода DRV8662 со встроенным повышающим импульсным преобразователем напряжения. Уменьшение габаритов измерительного преобразователя обеспечило повышение пространственного разрешения при выявлении малоразмерных дефектов в соответствии с современными требованиями.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, дефекты поверхности, электрометрия, сканирование, зонд Кельвина.

Abstract. Development and design of a small-sized scanning electrometric probe for semiconductor and nanostructured materials surface defect control are discussed. Improvement in signal-to-noise ratio is achieved by designing the vibration control system for electrometric probe on a basis of DRV8662 piezo haptic driver with integrated boost converter. Minimization of measuring transducer dimensions allowed improving the lateral resolution of a probe in accordance with current requirements.

Keywords: non-destructive testing, surface defects, electrometry, scanning, Kelvin probe.

При производстве изделий микроэлектроники, микромеханики и сенсорики по наиболее распространенной на сегодняшний день планарной технологии определяющую роль для качества продукции, количественно определяемого процентом выхода годных изделий, играет состояние поверхности подложек (полупроводниковых пластин), используемых для формирования приборных структур. Локальные изменения данного состояния, вызванные действием случайных факторов и, соответственно, имеющие случайное распределение по поверхности пластины, относят к дефектам поверхности. Их источником могут

быть как неидеальности исходного полупроводникового кристалла, так и технологические операции, выполняемые в процессе изготовления приборных структур (окисление, отжиг, имплантация, эпитаксия и т. д.). Физическая природа возникающих при этом дефектов чрезвычайно разнообразна: к типичным дефектам, влияющим на характеристики приборных структур современной микроэлектроники, относят, в частности, дислокации кристаллической решетки полупроводника, неравномерное распределение легирующей примеси и химические загрязнения, механические напряжения, микротрещины, поверхностные состояния на границах раздела, неравномерность эквивалентной электрической толщины диэлектрического слоя, фиксированный и подвижный заряд в диэлектрике и др. (рис. 1). Существенным источником дефектов являются посторонние частицы, осаждаемые на поверхности и границах раздела слоев полупроводниковых структур в ходе технологических операций, а также просто при транспортировке и хранении пластин между технологическими операциями.

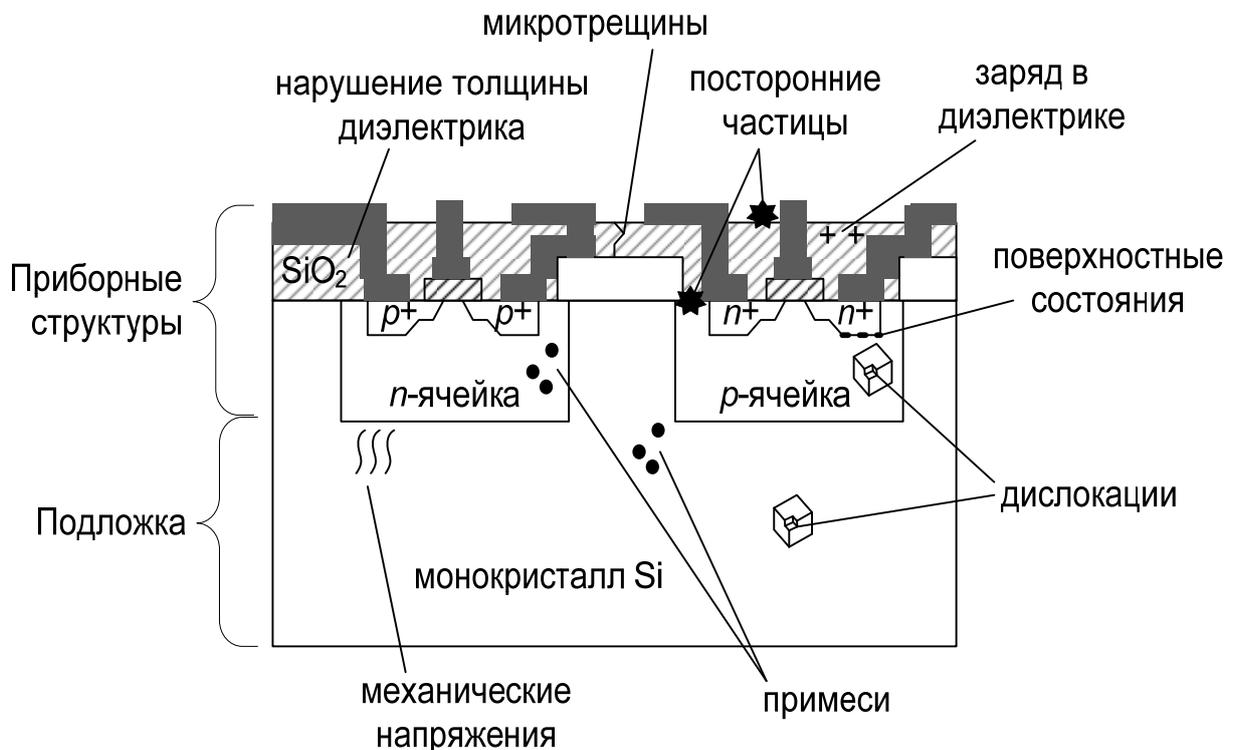


Рис. 1. Дефекты полупроводниковых структур

Уменьшение характерных размеров структурных элементов интегральных микросхем (ИМС) приводит к необходимости выявления дефектов с характерными размерами много меньше длины волны видимого оптического излучения, что делает их недоступными оптическим методам контроля. Кроме того, ряд перечисленных дефектов (поверхностные состояния, заряд в диэлектрике и др.) не относятся к структурным дефектам, обнаруживаемым прямым наблюдением. Современные требования, сформулированные в Перспективном плане *International Roadmap for Devices and Systems* по состоянию

на 2021 г. [1], устанавливают необходимость выявления дефектов поверхности полупроводника с характерными размерами от 3,5 нм, причем количество таких дефектов не должно превышать в среднем 133,5 на пластине диаметром 300 мм. Среднее количество дефектов с характерным размером 10,0 нм не должно превышать 5,7, а с характерным размером 20,0 нм – 0,7 на пластину диаметром 300 мм, т. е. в среднем менее одного дефекта на пластину. С учетом счетного количества допустимых дефектов Перспективный план прямо устанавливает необходимость не только выявления, но и картирования пространственного распределения дефектов по поверхности полупроводниковых пластин.

Разработанный с учетом этих требований в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ комплекс зондовых электрометрических методов и средств неразрушающего контроля полупроводниковых пластин использует для выявления и картирования дефектов метод сканирующего зонда Кельвина, основанный на определении локальных отклонений работы выхода электрона исследуемой поверхности [2]. Работа выхода электрона (РВЭ) является универсальной физической характеристикой, отражающей изменения любых электрофизических свойств поверхности, что позволяет выявлять дефекты различной физической природы с высокой чувствительностью. Достоинствами метода являются его бесконтактность и полное отсутствие каких-либо разрушающих воздействий на поверхность. При этом благодаря эффекту усреднения значений РВЭ под чувствительным элементом зонда обеспечивается выявление дефектов с характерными размерами много меньше поперечных размеров зонда при любом отличии РВЭ дефектов от РВЭ поверхности полупроводника (как в большую, так и в меньшую сторону). Непосредственно измеряемой таким зондом величиной является так называемая контактная разность потенциалов (КРП), пропорциональная разности значений РВЭ зонда и исследуемой поверхности. Таким образом, измерения РВЭ сканирующим зондом Кельвина являются не абсолютными, а относительными.

Пространственная разрешающая способность сканирующего зонда Кельвина определяется его поперечными размерами. Существенно, что каких-либо фундаментальных ограничений на минимальные размеры зонда не имеется. Так, известна реализация режима зонда Кельвина в атомно-силовой микроскопии [3]. В то же время увеличение пространственной разрешающей способности при той же заданной площади исследуемого объекта влечет за собой увеличение времени измерений вследствие необходимости получения большего числа отсчетов. Это требует соответствующего повышения быстродействия электрометрического зонда, что может быть достигнуто за счет использования схемотехнических решений, обеспечивающих меньшее время установления выходного сигнала.

Наибольшее распространение получила компенсационная схема измерения КРП (рис. 2, а), реализующая нулевой метод измерения, предусматривающий полную компенсацию сигнала КРП U_{CPD} напряжением обратной связи U_{out} , для

чего в цепь отрицательной обратной связи включается интегрирующее звено 7. Напряжение обратной связи, численно равно КРП (с обратным знаком), используется в этой схеме в качестве выходного сигнала. Быстродействие аналоговой компенсационной схемы принципиально ограничено инерционностью интегрирующего звена в схеме формирования сигнала.

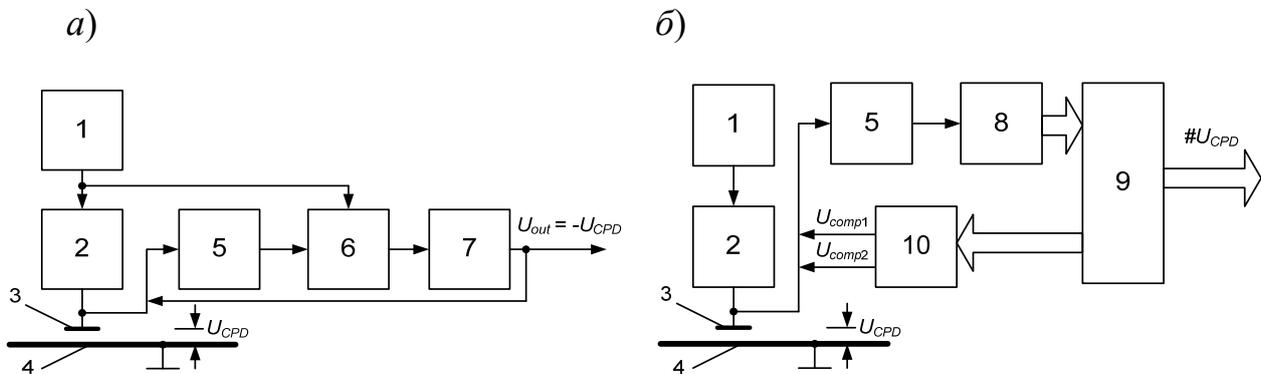


Рис. 2. Варианты схемотехнического решения измерительного преобразователя сканирующего зонда Кельвина: *а* – аналоговый компенсационный зонд Кельвина; *б* – цифровой зонд Кельвина; 1 – генератор синусоидальных колебаний; 2 – привод вибрации зонда; 3 – вибрирующий чувствительный элемент зонда Кельвина; 4 – исследуемая поверхность; 5 – усилитель; 6 – синхронный детектор; 7 – интегратор; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – микроконтроллер; 10 – источник фиксированных напряжений компенсации

Для исключения инерционного интегрирующего звена, а также с целью расширения диапазона измерений КРП и исключения погрешностей, связанных с работой усилителя 5 в режиме малого сигнала, авторами исследования разработана и практически реализована схема так называемого «цифрового» сканирующего зонда Кельвина [4], работающего в режиме неполной компенсации измерительного сигнала (рис. 2, *б*). В этом случае вместо компенсации входного сигнала U_{CPD} непрерывно изменяющимся напряжением обратной связи, вырабатываемым интегратором, в качестве напряжения компенсации на вход схемы по командам микроконтроллера 9 поочередно подаются два фиксированных напряжения U_{comp1} и U_{comp2} , не обеспечивающие полную компенсацию входного сигнала. Разностный переменный сигнал в обоих случаях анализируется микроконтроллером 9, а действительное значение КРП, передаваемое на выход схемы в цифровой форме, вычисляется на основе математической обработки двух полученных значений разностного сигнала. Использование фиксированных напряжений компенсации позволяет более чем на порядок сократить время переходных процессов в схеме и, соответственно, время установления выходного сигнала по сравнению со схемой аналогового зонда Кельвина (см. рис. 2, *а*). В то же время необходимо учитывать, что выходной сигнал чувствительного элемента вибрирующего чувствительного элемента зонда Кельвина представляет собой сигнал переменного напряжения

сложного гармонического состава [5]. В схеме аналогового компенсационного зонда Кельвина амплитуда этого сигнала за счет работы цепи компенсации приводится к нулю, а детектирование сигнала ошибки, представляющего собой переменное напряжение, обеспечивается синхронным детектором 6, связанным с генератором синусоидальных колебаний 1. Схема цифрового зонда Кельвина не содержит синхронного детектора, поскольку предусматривает работу непосредственно с переменным разностным сигналом. Вследствие этого к генератору синусоидальных колебаний 1 предъявляются повышенные требования не только в части компактности, но и в части минимизации наводок, создаваемых генератором на измерительной части схемы.

С учетом этих требований была разработана и реализована схема генератора синусоидальных колебаний для привода вибрации электрометрического зонда на основе интегрального драйвера пьезоэлектрического привода DRV8662 (рис. 3). Важным преимуществом данного драйвера является наличие встроенного повышающего импульсного преобразователя напряжения (*Boost converter*), что позволяет осуществлять питание генератора единым напряжением +5 В [6]. Пьезоэлектрический привод 3 подключается непосредственно к выходу интегрального драйвера, при этом все относительно высоковольтные цепи питания пьезоэлектрического привода, способные являться источниками электромагнитных наводок, практически полностью сосредоточены внутри корпуса драйвера, чем обеспечивается их эффективное экранирование.

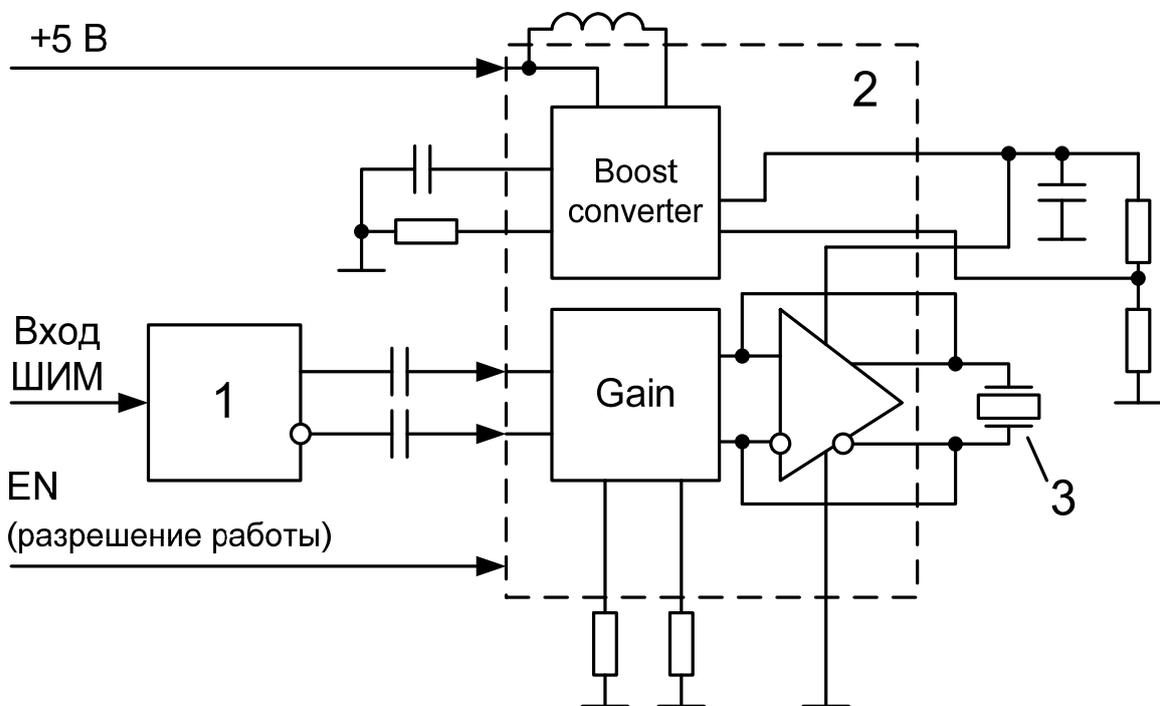


Рис. 3. Привод вибрации электрометрического зонда на основе интегрального драйвера DRV8662: 1 – формирователь дифференциального сигнала; 2 – интегральный драйвер пьезоэлектрического привода DRV8662; 3 – пьезоэлектрический привод

В реализованной схеме управление драйвером осуществляется сигналом широтно-импульсной модуляции (ШИМ), вырабатываемым управляющим микроконтроллером (см. рис. 2, б). Таким образом, как обработка измерительных сигналов, так и управление вибрацией зонда осуществляются цифровым методом с помощью единого управляющего узла, чем обеспечивается высокая стабильность работы цифрового зонда Кельвина. Поскольку для управления пьезоэлектрическим приводом используется дифференциальный сигнал, в схему привода вибрации включен формирователь дифференциального сигнала 1. Помимо данного формирователя и собственно драйвера DRV8662, схема содержит минимальное количество компонентов, необходимых для нормальной работы драйвера. Амплитуда вырабатываемого сигнала регулируется встроенным в драйвер регулятором *Gain*, частота определяется входным сигналом ШИМ.

Рассмотренные схемотехнические решения позволяют значительно (более чем на порядок) повысить быстродействие цифрового зонда Кельвина по сравнению с аналоговым при меньших габаритах электронных узлов, что способствует повышению компактности измерительного преобразователя и достижению пространственной разрешающей способности контроля в соответствии с современными и перспективными требованиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Roadmap for Devices and Systems. 2021 Update: Yield Enhancement [Electronic resource]. – Mode of access: https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS_YE.pdf. – Data of access: 25.07.2022.
2. Scanning photostimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters / A. Tyavlovsky [et al.] // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2, iss. 4. – P. 47–51.
3. **Zharin, A. L.** Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A. L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B. Bhushan). – Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. – P. 687–720.
4. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.
5. Kelvin probe error compensation based on harmonic analysis of measurement signal / A. K. Tyavlovsky [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2014. – № 3. – P. 251–254.
6. DRV8662 Piezo Haptic Driver with Integrated Boost Converter [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8662.pdf>. – Data of access: 25.07.2022.

E-mail: tyavlovsky@bntu.by, nil_pt@bntu.by.

УДК 535.32: 621.378

**РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР**

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 535.32: 621.378

**PARAMETER TESTING OF THIN-FILM STRUCTURE
BY REFLECTOMETRY TECHNIQUE**

A. V. KHOMCHENKO, I. U. PRIMAK

Аннотация. Рассмотрены особенности и пределы применимости методов измерения параметров тонкопленочных структур, основанных на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения поляризованного светового пучка в схеме призмного возбуждения волноводных, вытекающих мод или его отражения от поверхности исследуемой структуры.

Ключевые слова: волноводная спектроскопия, рефлектометрия, контроль параметров тонкопленочной структуры.

Abstract. The waveguide and reflectometry techniques for measuring of the absorption coefficient, refractive index and thickness of dielectric and metal thin-film structures are discussed.

Keywords: waveguide spectroscopy, reflectometry, parameter testing of thin-film structure.

Оптические методы контроля параметров тонких пленок представляют практический интерес в технологии нанесения тонкопленочных структур различного функционального назначения. Традиционно для этого используется эллипсометрия. В ряде работ продемонстрирована высокая чувствительность методов рефлектометрии и волноводной спектроскопии к вариациям параметров тонкопленочных структур. В работе рассмотрены особенности и пределы применимости методов волноводной спектроскопии и угловой рефлектометрии для контроля параметров тонкопленочных структур. Указанные методы основаны на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка $R(\gamma)$ в схеме призмного возбуждения волноводных, вытекающих, плазмонных мод или его отражения от поверхности исследуемой структуры. При возбуждении волноводных мод в традиционной схеме зависимость $R(\gamma)$ для $\lambda = 633$ нм представлена на рис. 1 (кривая 1).

Аналогичное распределение регистрируется при возбуждении вытекающих мод в тонкопленочной структуре (см. рис. 1, кривые 2 и 3). Комплексная постоянная распространения возбуждаемых оптических мод зависит от оптических и геометрических параметров тонкопленочной структуры, что при соответствующей обработке зарегистрированной зависимости $R(\gamma)$ позволяет определить их параметры. Структуры 1–3 были получены в ходе одного технологического цикла. Параметры аморфной пленки SiO_x на различных подложках,

измеренные в случае волноводных и вытекающих мод, приведены в табл. 1. Погрешность измерения не превышает $1 \cdot 10^{-4}$ для показателя преломления n и $\sim 3\%$ для коэффициента поглощения k и толщины d .

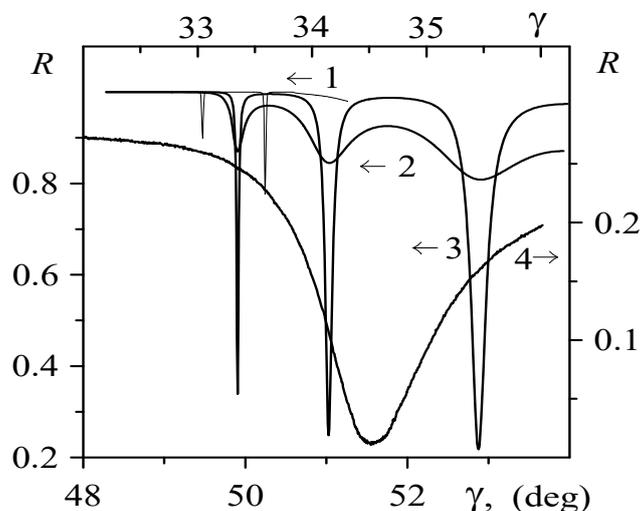


Рис. 1. Угловая зависимость коэффициента отражения светового пучка при возбуждении оптических мод в тонкопленочной структуре SiO_x на подложке из кварцевого стекла (1), пленке SiO_x на подложке из стекла К8 (2) и кремния (3), пленке алюминия на подложке из стекла (4)

Табл. 1. Параметры пленок SiO_x на различных подложках

Структура	n	$k, \times 10^{-5}$	$d, \text{мкм}$
$\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$	1,47095	3,39	2,51
SiO_x/Si	1,47091	3,34	2,53

Принципиальная схема установки для измерения распределения $R(\alpha)$ приведена на рис. 2. Реализуемый в таком случае метод угловой оптической рефлектометрии, основанный на измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры, позволяет определить параметры (комплексный показатель преломления $n = x_2 + ix_3$ и толщина x_1) металлической пленки путем минимизации целевой функции

$$I = \sum_{j=1}^n [f(x_i, \gamma_j) - R(\gamma_j)]^2,$$

где $f(x_i, \gamma_j)$ – рассчитанные значения параметров на основе используемой модели.

Метод угловой рефлектометрии представляет также интерес для определения параметров наноразмерных диэлектрических структур. Он основан на многоугловом измерении коэффициента отражения света от исследуемой структуры и последующей оценке необходимых параметров с помощью метода

наименьших квадратов (МНК) при минимизации суммы квадратов невязок:

$$S(z) = \sum_{\rho=1}^2 \sum_{i=1}^n \left(R_i^e - R(\rho, \gamma_i, z) \right)^2,$$

где R_i^e – измеренное значение коэффициента отражения света, имеющего поляризацию ρ , при угле падения света γ_i , отсчитанном от нормали к поверхности слоистой структуры ($i = \overline{1, n}$); $R(\rho, \gamma_i, z)$ – рассчитанное значение коэффициента отражения на основе предполагаемой модели диэлектрической проницаемости структуры; z – комплекс неизвестных параметров структуры, которые необходимо оценить (в данном случае диэлектрическая проницаемость и толщина слоя SiO_2), $z = (\varepsilon, d)$; n – количество углов, при которых производится измерение.

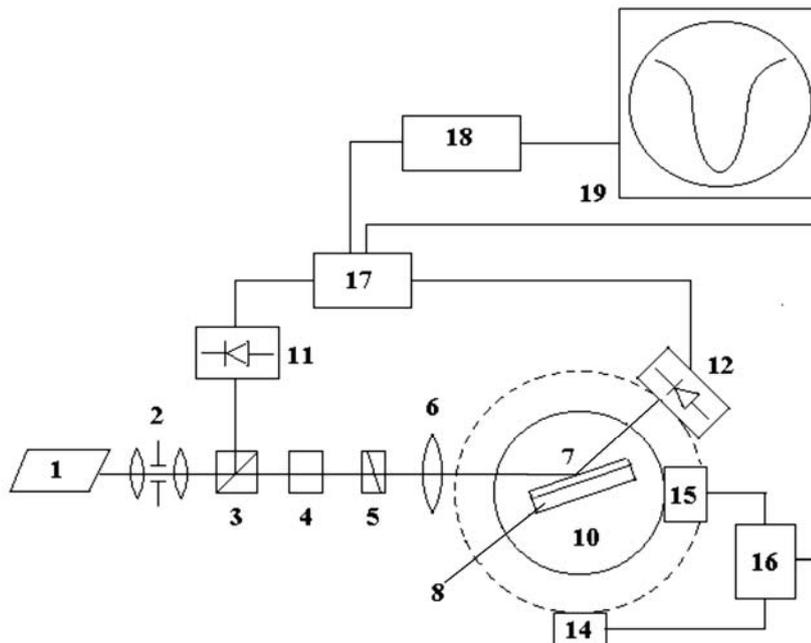


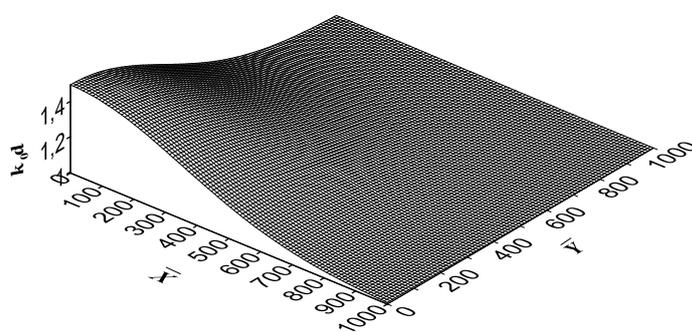
Рис. 2. Схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения лазерного пучка: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – делитель пучка; 4 – аттенюатор; 5 – поляризатор; 6 – линза; 7 – тонкопленочная структура на подложке 8; 10 – поворотный столик; 11, 12 – фотоприемники; 14, 15 – шаговые двигатели; 16 – блок синхронного управления шаговыми двигателями; 17 – блок сравнения каналов; 18 – АЦП; 19 – компьютер

Результаты измерений и численного моделирования отражения света от структуры с учетом погрешностей регистрации коэффициента отражения ($\delta R \sim 0,005$) и решения обратной задачи определения параметров структуры показывают, что определение параметров слоев может быть достаточно точным при $d > 0,05$ мкм. Более высокой чувствительности и точности определения указанных параметров можно достигнуть при использовании так называемой призмной схемы измерения (призма, приведенная в контакт с исследуемой структурой). Это подтверждают результаты измерений и численного модели-

рования отражения света от призмы, приведенной в контакт со структурой Si-SO₂. Толщина буферного слоя 0,1 мкм определялась методом наименьших квадратов с погрешностью менее 5 %. Аналогичные исследования отражения света от призмы с металлическим (Au) слоем показали, что восстановление параметров слоя SiO₂ эффективно при его толщинах больших 0,05 мкм. Погрешности восстановления менее 6 % достигаются при оптимальной толщине слоя Au ~ 0,03 мкм.

В рамках задачи восстановления распределения толщины $d(x,y)$ слоя SiO₂ исследовано отражение света от неоднородного слоя, расположенного на кремниевой подложке (рис. 3).

a)



b)

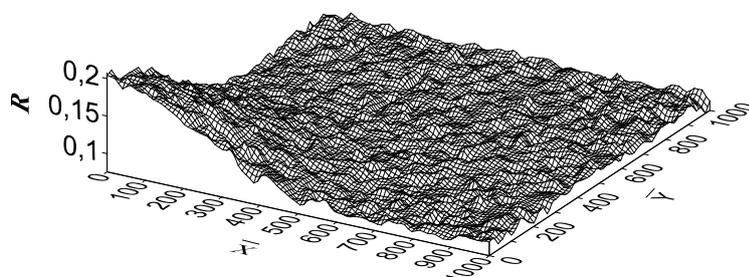


Рис. 3. Распределения толщины (a) слоя SiO₂ и соответствующего коэффициента отражения (б)

Для определения распределения $d(x,y)$ использована аппроксимация распределения толщины слоя многочленами Чебышева. Погрешность определения d не превышала 10 %.

Таким образом, метод исследования оптических свойств тонких пленок, основанный на регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка при возбуждении мод оптического диапазона, и метод угловой оптической рефлектометрии применимы для контроля и измерения параметров тонкопленочных структур, используемых в оптике и микроэлектронике.

УДК 620.179.14

ВИХРЕТОКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ 12X18H10T

A. V. ЧЕРНЫШЕВ, В. И. ШАРАНДО, Н. В. КРЕМЕНЬКОВА, В. Д. ПИУНОВ

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

EDDY CURRENT THICKNESS MEASUREMENT OF DIELECTRIC COATINGS ON DEFORMED STEEL 12Cr18Ni10Ti

A. V. CHERNYSHEV, V. I. SHARANDO, N. V. KREMENKOVA, V. D. PIUNOV

Аннотация. Выполнены исследования по толщинометрии диэлектрических покрытий на пластически деформированной аустенитной стали 12X18H10T с помощью вихретокового метода. Приведены зависимости амплитуды вносимой ЭДС накладного преобразователя на частоте 2 кГц от толщины покрытия в диапазоне 0...2500 мкм при степенях деформации основания 0 %...50 %, которые могут выбираться в качестве градуировочных на основе измерений сигнала на непокрытом основании. Показано, что может быть построена единая градуировочная кривая для любых степеней деформации основания и предложена методика её использования.

Ключевые слова: диэлектрические покрытия, ферромагнитное основание, толщина покрытий, вихретоковые толщинометры, неразрушающий контроль.

Abstract. Thickness measurements of dielectric coatings on plastically deformed austenitic steel 12Cr18Ni10Ti were studied using the eddy current method. The dependences of the amplitude of the introduced EMF of the superimposed transducer at the frequency of 2 kHz on the coating thickness in the range of 0...2500 μm with degrees of deformation of the steel 0 %...50 %, which can be selected as calibration ones based on signal measurements on an uncoated basis, are given. It is shown that a single calibration curve can be constructed for any degree of deformation of the basis and the method for its use is proposed.

Keywords: dielectric coating, ferromagnetic base, coating thickness, eddy current, thickness meter, non-destructive testing.

Применение вихретоковых методов при изучении и контроле аустенитных нержавеющей сталей обусловлено высокой чувствительностью измеряемых сигналов к изменениям их электропроводности и магнитной проницаемости [1–3]. В то же время непостоянство этих физических характеристик в указанных сталях как материалах оснований может стать источником погрешностей при контроле толщин нанесенных на них немагнитных покрытий [4–6]. В работе выполнены исследования по толщинометрии диэлектрических покрытий на основаниях из пластически деформированной аустенитной стали 12X18H10T с помощью вихретокового трансформаторного метода.

Из стального листа толщиной 10 мм, находившегося в состоянии поставки, были вырезаны квадратные образцы 21×21 мм². Затем путем многократной прокатки при комнатной температуре во взаимно перпендикулярных направлениях были обеспечены различные величины степени их пластической

деформации. Степень пластической деформации ε образцов определялась как изменение (в процентах) их толщины после деформирования относительно начальной. При проведении исследований эти образцы использовались в качестве оснований, на которые накладывались покрытия в виде диэлектрических пленок и пластинок различной толщины.

Вихретоковый накладной преобразователь состоял из трех расположенных соосно катушек – поля возбуждения, измерительной и компенсационной. Две последние катушки располагались у торцов катушки поля возбуждения и были включены дифференциально между собой. Компенсация выходного напряжения до нулевого значения производилась при расположении преобразователя вдали от проводящих тел. В процессе работы по катушке поля возбуждения пропусклся ток синусоидальной формы частотой 2,0 кГц. Измерялась амплитуда вносимой ЭДС преобразователя.

На рис. 1 приведена зависимость амплитуды вносимой ЭДС от степени пластической деформации образца.

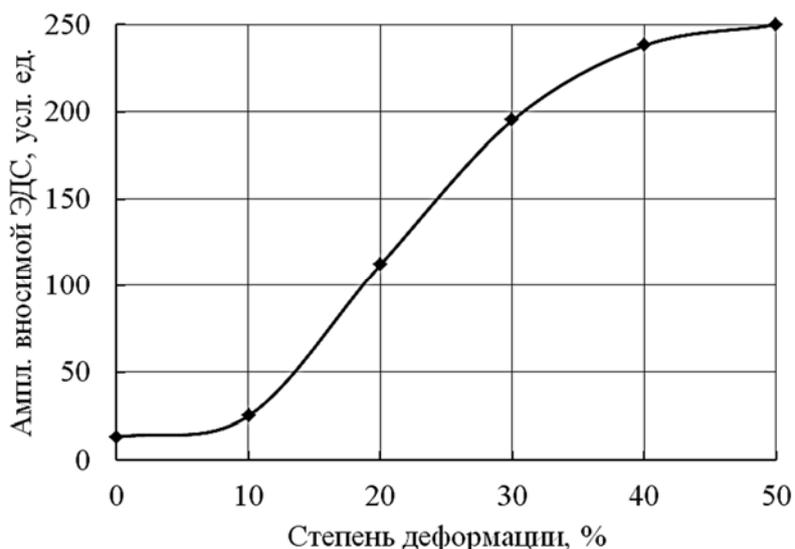


Рис. 1. Зависимость амплитуды вносимой ЭДС от степени пластической деформации основания без покрытия

Согласно рис. 1, в первой половине диапазона деформаций происходит ускоряющийся рост амплитуды вносимой ЭДС, затем скорость ее изменения замедляется. Это объясняется возрастанием начальной магнитной восприимчивости χ_{in} контролируемых образцов на первоначальном этапе увеличения ε за счёт роста процентного содержания в них ферромагнитной α' -фазы [1]. Уменьшение чувствительности к изменениям ε во второй части её диапазона объясняется уменьшением χ_{in} с возрастанием плотности дислокаций [2].

На рис. 2, а представлены зависимости амплитуды вносимой ЭДС от толщины покрытия при степенях пластической деформации основания ε от 0 % до 50 %. На рис. 2, б изображены кривые для $\varepsilon = 0$ % и $\varepsilon = 10$ % в укрупненном масштабе.

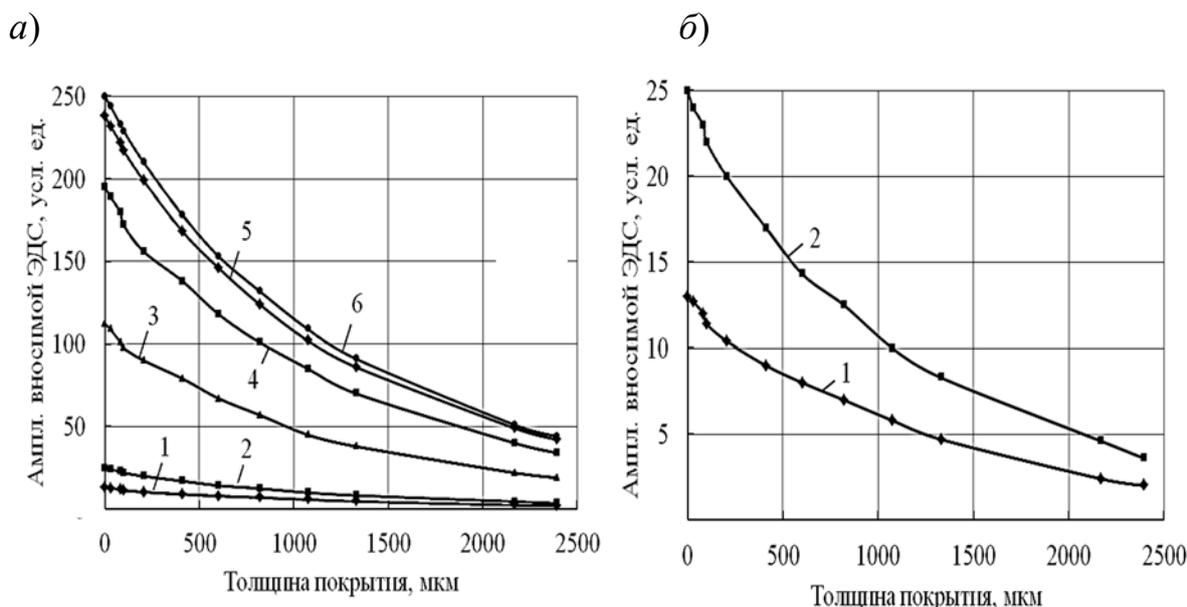


Рис. 2. Зависимости амплитуды вносимой ЭДС от толщины покрытия при разных степенях пластической деформации ε , %, основания: *a* – 1 – 0 %; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 30 %; 5 – 40 %; 6 – 50 %; *б* – 1 – 0 %; 2 – 10 %

Согласно рис. 2, зависимости амплитуд вносимой ЭДС от толщины покрытия представляют собой ряд смещенных относительно друг друга непересекающихся линий, которые могут быть использованы в качестве градуировочных при толщинометрии. При этом чувствительность измерений оказывается достаточной в области как сильных, так и слабых из исследованных деформаций. Для выбора градуировочной кривой необходимо выполнить предварительное измерение сигнала толщиномера на материале изделия без покрытия. Таким образом устанавливается, какая точка кривой рис. 1 имеется в качестве нулевой. Соответствующая ей кривая берется из рис. 2 и должна использоваться при дальнейшей толщинометрии.

С учетом того, что на практике количество градуировочных кривых ограничено, установлена возможность получения единой универсальной зависимости, применяемой при любых степенях пластической деформации. Для этого необходимо привести все кривые рис. 2 к виду, при котором их значения на основании без покрытия имеют одинаковую величину. В данной работе это достигается посредством умножения всех значений каждой кривой на индивидуальный коэффициент, определяемый путем деления полученного предварительно максимального значения амплитуды вносимой ЭДС (то есть по оси ординат на рис. 1) на значение амплитуды, полученное для выбранной зависимости от толщины на основании без покрытия.

На рис. 3 изображены с умножением на найденные коэффициенты все кривые рис. 2. Величины деформаций на рис. 3 не приводятся ввиду практически полного совпадения кривых. В качестве единого значения, к которому приводились все измерения на основаниях без покрытий, выбрано число 250 (см. рис. 1), соответствующее сигналу, полученному на основании с максимальной исследованной пластической деформацией $\varepsilon = 50\%$.

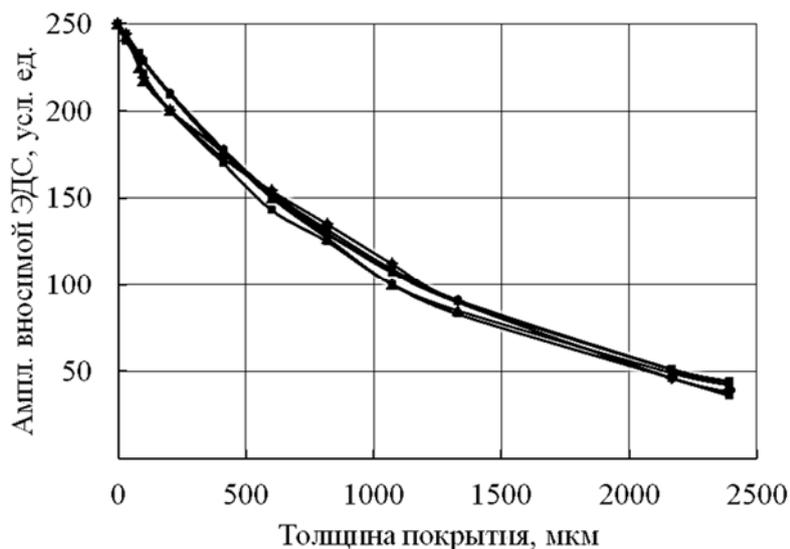


Рис. 3. Приведенные к единому значению на основании без покрытия зависимости амплитуды вносимой ЭДС от толщины покрытия при степенях пластической деформации основания $\varepsilon = 0\%$; 10% ; 20% ; 30% ; 40% ; 50%

Согласно рис. 3, в результате проведенной операции получена единая градуировочная кривая, позволяющая осуществлять толщинометрию диэлектрических покрытий на стали 12Х18Н10Т без привлечения банка данных, полученных по измерениям на комплекте покрытий при разных степенях деформации основания.

Таким образом, в результате измерений зависимости амплитуды вносимой ЭДС от толщины диэлектрических покрытий на основаниях из подвергнутой разным степеням пластической деформации стали 12Х18Н10Т показано, что по величине сигнала на основании без покрытия можно определить степень его пластической деформации. На базе этой информации осуществляется выбор градуировочной кривой для определения толщины диэлектрического покрытия на данном основании. Возможно создание единой градуировочной кривой, позволяющей определять толщину покрытия при любой степени деформации основания. Методика выхода на универсальную градуировочную кривую предполагает сначала измерения амплитуды вносимой ЭДС на основании без покрытия, имеющего максимальное значение ε . Затем осуществляется деление его на значение амплитуды вносимой ЭДС, измеренной на подлежащем контролю изделии без покрытия (то есть с неизвестной величиной ε). В результате определяется коэффициент, на который в дальнейшем производится умножение всех результатов измерений на данном основании с нанесенными на него покрытиями. Таким образом осуществляется приведение градуировки на любом основании к единой градуировке, характерной для основания с максимальной величиной ε , которая устанавливается

предварительно.

На практике градуировочная кривая может быть построена при наложении покрытий различной толщины на изделие с часто встречающимся уровнем структурных напряжений. Для вычисления необходимых далее коэффициентов используется сигнал прибора, полученный на этом изделии без покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армко-железа, стали 12Х18Н10Т и составного материала «сталь 12Х18Н10Т – армко-железо – сталь 12Х18Н10Т» / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 16–30.
2. **Jiles, D.** Magnetism and Magnetic Materials / D. Jiles. – London; New York: CRC Press, 2016. – 576 p.
3. **Чернышев, А. В.** Использование вихретокового метода контроля при изучении процесса пластического деформирования стали 12Х18Н10Т / А. В. Чернышев, В. И. Шарандо, Н. В. Кременькова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 304–305.
4. **Дорофеев, А. Л.** Индукционная толщинометрия / А. Л. Дорофеев, А. И. Никитин, А. Л. Рубин. – 2-е изд. – Москва: Металлургия, 1978. – 184 с.
5. **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.
6. **Соболев, В. С.** Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

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

УДК 620.172.21

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФРАКЦИЕЙ НЕЙТРОНОВ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА*С. А. ЧИЖИК¹, М. Л. ХЕЙФЕЦ², Д. А. ВИНТОВ², В. Т. ЭМ³, И. В. КАРПОВ³*¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси²Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

³Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Гатчина, Россия

UDC 620.172.21

NANOINDENTATION AND DETERMINATION OF THE STRAIN STATE OF A MATERIAL BY NEUTRON DIFFRACTION*S. A. CHIZHIK, M. L. KHEIFETZ, D. A. VINTOV, V. T. EM, I. V. KARPOV*

Аннотация. При имеющейся необходимости для калибровки приборов, предназначенных для оценки напряженно-деформированного состояния металлических конструкций, в странах СНГ и за рубежом отсутствует эталон механического напряжения. На уровне атомарно-кристаллической решетки измерения ее деформации можно проводить только по результатам дифракции излучения. Наиболее точные измерения деформации возможны при использовании дифракции нейтронов.

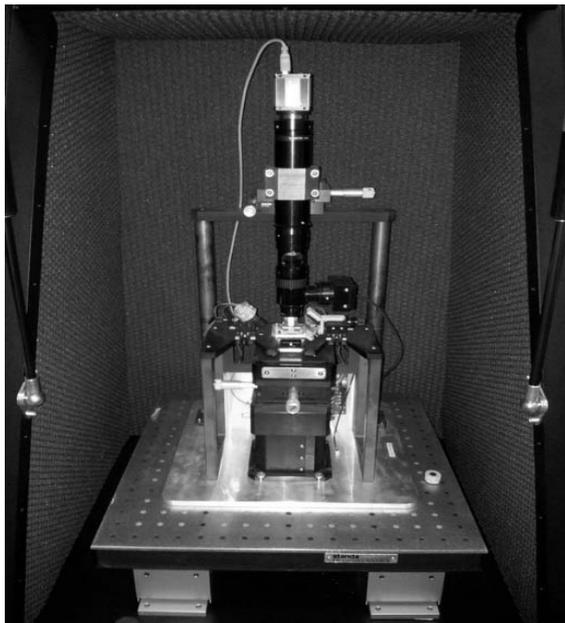
Ключевые слова: наноиндентирование, дифракция нейтронов, деформированное состояние материала.

Abstract. In the CIS countries and abroad, there is no standard of mechanical stress, which is necessary for calibrating instruments designed to assess the stress-strain state of metal structures. At the level of the atomic-crystal lattice, its deformation can be measured only from the results of radiation diffraction. The most accurate strain measurements are possible using neutron diffraction.

Keywords: nanoindentation, neutron diffraction, strain state of a material.

Введение. Изучение физико-механических характеристик на различных структурных уровнях вещества твердого тела – важнейшее направление современного материаловедения. На макроуровне материал чаще всего характеризуют твердостью, т. е. сопротивлением проникновению в тело образца другого тела – индентора. Твердость определяется по отпечатку на поверхности материала от воздействия индентора (размерность в квадратных метрах) под прилагаемой нагрузкой (с усилием в ньютонах). Соответственно, на микроуровне определяют микротвердость, а индентором является алмазный наконечник (чаще всего в форме пирамиды). На наноуровне измерение напряженно-деформированного состояния производится сканирующим зондовым микроскопом (рис. 1, а). Проникновения индентора (рис. 1, б) в твердое тело не происходит, а нанотвердость измеряют по упругому отклонению измерительной консоли зонда с алмазным наконечником-иглой.

a)



б)

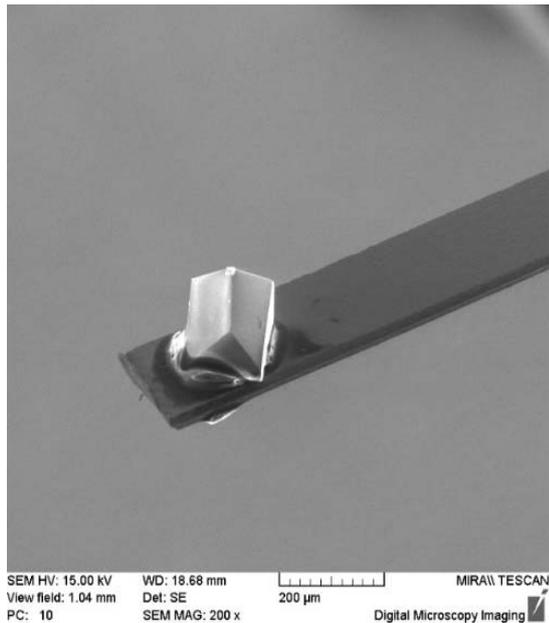


Рис. 1. Метрологический сканирующий зондовый микроскоп (а), алмазный индентор и его острие (б): характерный размер – 70...100 мкм; радиус острия – 250 нм

На уровне атомарно-кристаллической решетки измерения ее искажений (деформации) можно определить только по результатам дифракции рентгеновского или другого излучения. Наиболее точные измерения деформации решетки в настоящее время возможны при использовании дифракции нейтронов (рис. 2). Деформация решеток кристаллических и поликристаллических материалов определяет их напряженное состояние, измеряемое и рассчитываемое в ньютонах на квадратный метр.

Проблема измерения механического напряжения является сегодня весьма актуальной, особенно когда под действием нагрузок или вследствие большого срока эксплуатации происходят техногенные катастрофы.

При отсутствии эталона механического напряжения, с помощью которого должны поверяться приборы для измерения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, это сделать невозможно, т. к. каждое средство измерения имеет свою погрешность определения численного значения измеряемой величины.

Относительно недавно разработаны и приняты в международной практике нормативные документы, регламентирующие измерения механического напряжения конкретными методами неразрушающего контроля. Однако в общем случае представленные нормативные документы носят рекомендательный характер и не могут быть использованы при создании эталона механического напряжения. В то же время потребности практики требуют постоянной оценки надежности конструкций, мерой которой может служить удаленность действующих напряжений от задаваемых их предельных значений.

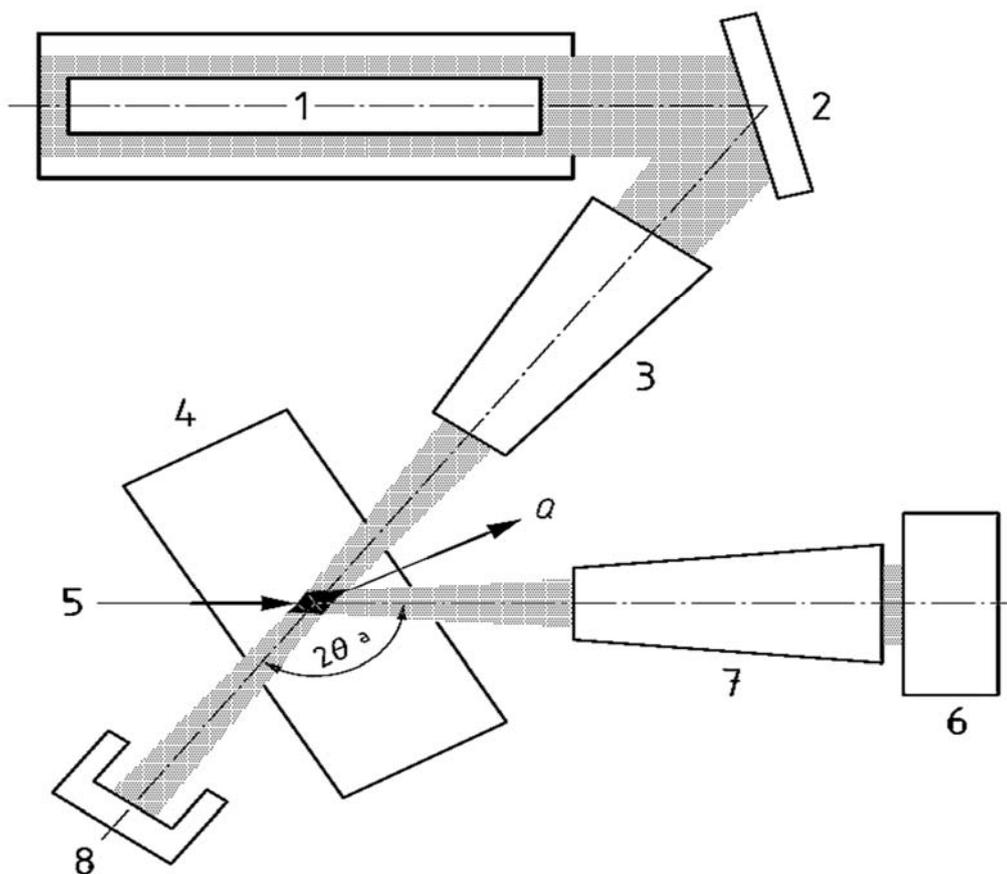


Рис. 2. Схематическое изображение дифрактометра на основе стационарного источника для определения упругой деформации кристаллической решетки: 1 – источник пучка нейтронов; 2 – монохроматор; 3 – оптическая система для фокусировки пучка нейтронов и экранирования; 4 – образец; 5 – измерительный объем; 6 – детектор; 7 – оптическая система для дифрагированного пучка и экранирования; 8 – ограничитель пучка; Q – вектор рассеяния; 2θ – угол рассеяния

Методика и приборы измерений. В настоящее время методы неразрушающего контроля (магнитный, вихретоковый и др.) позволяют произвести относительную оценку НДС стальных конструкций. Поскольку любое измерение есть сравнение с эталоном, то отсутствие последнего не позволяет производить измерения внутренних напряжений в сталях. Одноосный эталон не подходит для этой цели вследствие того, что в нем напряжения не зависят от величины другого главного напряжения, действующего в перпендикулярном направлении, а в реальных конструкциях напряжения всегда как минимум двухосны [1].

В связи с этим разработана концепция двухосного эталона напряжений и проведены необходимые для его изготовления аналитические расчеты. Конструктивно эталон представляет собой механическое устройство для растяжения крестообразного образца во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 3, а).

Форма и размеры центральной части образца подбираются таким образом, чтобы при приложенной к образцу двухосной нагрузки возникающее в центральной части НДС было наиболее однородным. Величина создаваемого

механического напряжения контролируется с помощью тензодатчиков (ТД), наклеенных на одну из сторон центральной части крестообразного образца (рис. 3, б). Противоположная сторона образца используется для проведения измерений и калибровки средств неразрушающего контроля. Толщина центральной части образца составляет 2 мм [2].

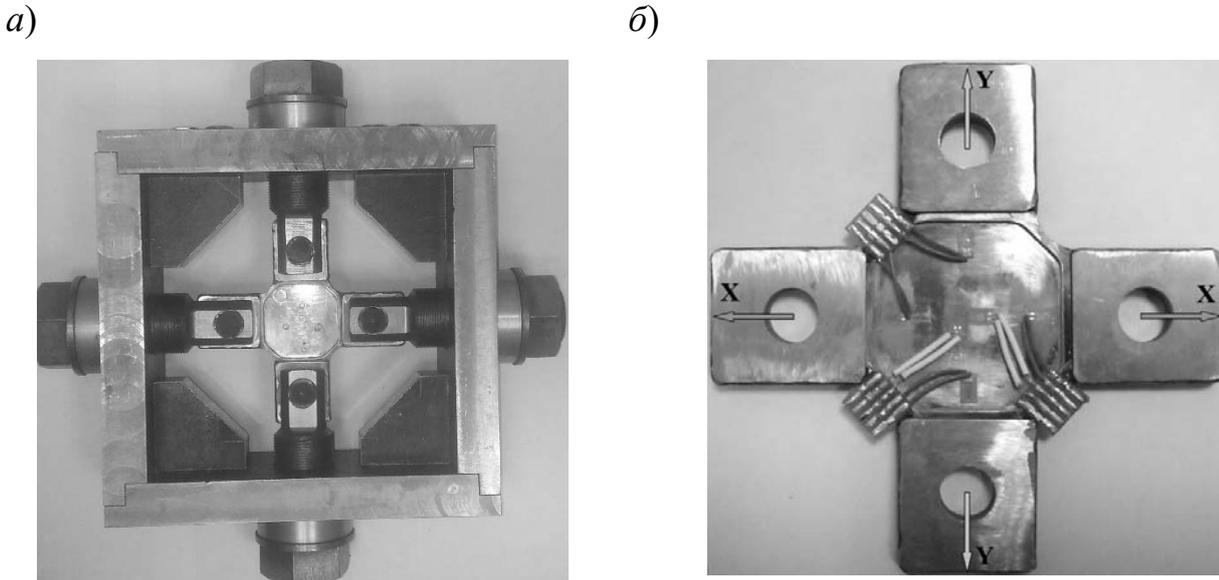


Рис. 3. Прототип двухосного эталона механического напряжения (а) и расположение тензодатчиков на поверхности одной из сторон центральной части образца (б)

Прототип двухосного эталона механического напряжения был изготовлен в Институте прикладной физики НАН Беларуси (г. Минск) и испытан на стресс-дифрактометре в НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва).

Стресс-дифрактометр представляет собой совокупность нескольких взаимосвязанных устройств: реактор ИР-8, горизонтальный экспериментальный канал (ГЭК-3), коллиматор, монохроматор, *Cd*-щель, гониометр для позиционирования образца, детектор ПЧД. На рис. 4 представлена схема стресс-дифрактометра, собранная в НИЦ «Курчатовский институт» [3].

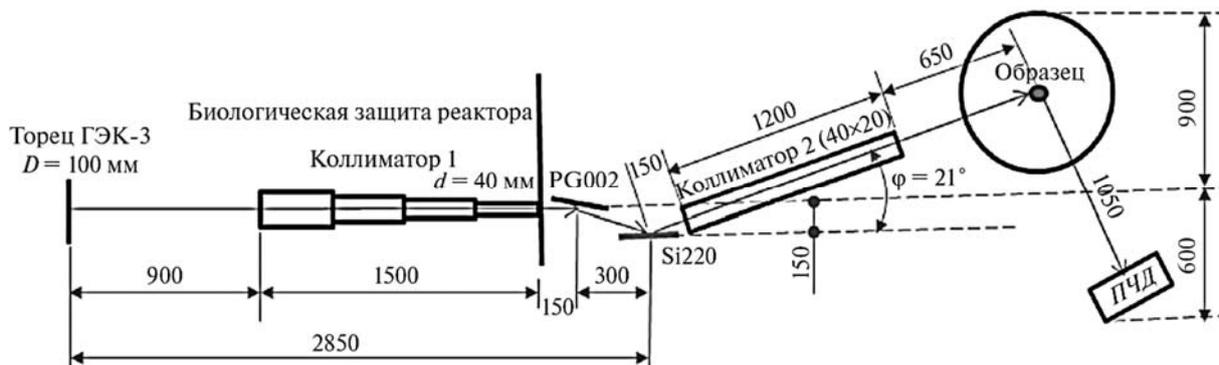


Рис. 4. Схема стресс-дифрактометра на ГЭК-3 реактора ИР-8 с двухкристалльным монохроматором PG002/Si/220 [3]

Важной задачей при исследовании напряженного состояния образца методом дифракции нейтронов (МДН) является точное определение параметра d_0 для продольной и поперечной составляющей компонент тензора напряжения, который характеризует начальное состояние образца при отсутствии нагрузки.

В исследовании этот параметр используется для определения деформации нагруженного образца согласно следующему выражению:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0}, \quad (1)$$

где d , d_0 – межплоскостные расстояния для деформированной и недеформированной решеток соответственно.

Для определения параметра d_0 крестообразный образец устанавливается на гониометре. Пробный объем измерения выбирается равным $1 \times 1 \times 3$ мм³. Путем точных перемещений движущихся частей гониометра достигается условие полного расположения пробного объема в материале образца, что должно обеспечить высокую точность измерения компонент тензора деформации.

После измерения параметра d_0 крестообразный образец устанавливается в нагрузочное устройство (см. рис. 3). Затем происходит пошаговое нагружение образца и измерение в нем компонент тензора деформации (продольной и поперечной составляющей, т. к. изменение нормальной составляющей считается равным нулю из-за малой толщины исследуемой области образца).

Результаты измерений, расчетов и обсуждение. По вычисленным величинам компонент тензора деформации ε_x , ε_y , ε_z вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений x , y , z при трех ориентациях образца [4], используя обобщенный закон Гука, вычисляют компоненты тензора напряжения σ_x , σ_y , σ_z :

$$\begin{cases} \sigma_x = E \left[(1 - 2\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right] / (1 + \nu)(1 - 2\nu); \\ \sigma_y = E \left[(1 - 2\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right] / (1 + \nu)(1 - 2\nu); \\ \sigma_z = E \left[(1 - 2\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right] / (1 + \nu)(1 - 2\nu). \end{cases} \quad (2)$$

Проблемой МДН является то, что из-за недостаточной яркости существующих источников нейтронов измерения занимают сравнительно длительное время, и это ограничивает возможности метода по пространственному разрешению (~ 1 мм³) и по глубине (~ 40 мм для стали). Также к недостаткам метода можно отнести невозможность исследования материалов, содержащих нейтронпоглощающие элементы, такие как B , Cd [5]. Тем не менее на практике

МДН считается одним из самых точных в области измерения величины механического напряжения в образце, находящемся под нагрузкой. Поэтому ожидается, что результаты проведенного исследования будут близки к реальным значениям напряжения, к которым можно отнести показания ТД, наклеенных на исследуемый образец.

Заключение. Анализ проведенных исследований показал относительно небольшое расхождение результатов, полученных с помощью измерения тензодатчиками (ТД) и методом дифракции нейтронов (МДН).

Установлено некоторое выравнивание результатов измерения при увеличении нагрузки в исследуемом образце. Выравнивание результатов продольной компоненты тензора напряжений происходит быстрее по сравнению с поперечной компонентой, что может быть связано со слабо выраженной анизотропией образца.

Определение малых величин возникающего в образце напряжения МДН пока еще проблематично вследствие того, что на результаты измерения оказывает влияние статистическая погрешность.

Начальные результаты проведенного анализа позволили наметить направления дальнейших исследований, в частности, такие как уточнение влияния параметров нейтронной дифрактометрии на точность воспроизведения единицы напряжений, стабильность изучаемых свойств и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sablik, M. J.** Modeling the Effects of Biaxial Stress on Magnetic Properties of Steels with Application to Biaxial Stress NDE / M. J. Sablik // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 1995. – Vol. 12, № 2. – P. 87–102.
2. Особенности измерения напряжений в ферромагнетиках методом эффекта Баркгаузена / В. Л. Венгринович [и др.] // *Контроль. Диагностика*. – 2017. – № 8. – С. 10–17.
3. Двухкристальный монохроматор для нейтронной стресс-дифрактометрии / В. Т. Эм [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. – 2017. – № 4. – С. 75–81.
4. *Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction* / M. T. Hutchings [et al.]. – London: Taylor and Francis. – 2005.
5. Исследования внутренних напряжений в материалах для атомной науки и техники / А. В. Тамонов [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2004. – С. 359–366.

УДК 620.179.14

МАГНИТОДИНАМИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ НЕМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т***В. И. ШАРАНДО, А. В. ЧЕРНЫШЕВ, Н. В. КРЕМЕНЬКОВА, В. Д. ПИУНОВ***

Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

MAGNETODYNAMIC THICKNESS METHOD OF NON-MAGNETIC COATINGS ON DEFORMED STEEL 12Cr18Ni10Ti***V. I. SHARANDO, A. V. CHERNYSHEV, N. V. KREMENKOVA, V. D. PIUNOV***

Аннотация. Выполнены исследования по толщинометрии немагнитных покрытий на пластически деформированной аустенитной стали 12Х18Н10Т с помощью магнитодинамического метода. Приведены зависимости сигнала толщиномера МТЦ-3-2 от толщины покрытия в диапазоне 0...2500 мкм при степенях деформации основания 0 %...50 %, которые могут выбираться в качестве градуировочных на основе измерений сигнала на непокрытом основании. Показана возможность построения общей градуировочной кривой для разных степеней деформации основания.

Ключевые слова: немагнитные покрытия, ферромагнитное основание, толщина покрытий, магнитодинамические толщиномеры, неразрушающий контроль.

Abstract. Studies on the thickness measurement of non-magnetic coatings on plastically deformed austenitic steel 12Cr18Ni10Ti using the magnetodynamic method have been carried out. The dependences of the MTC-3-2 thickness meter signal on the coating thickness in the range of 0...2500 μm are given for base deformation degrees 0 %...50 %, which can be selected as calibration ones based on signal measurements on uncoated base. The possibility of constructing the general calibration curve for different degrees of deformation of the base is shown.

Keywords: dielectric coating, ferromagnetic base, coating thickness, magnetodynamic thickness meter, non-destructive testing.

При пластической обработке аустенитной стали 12Х18Н10Т в её структуре происходит формирование ферромагнитной α -фазы [1]. В [2] показано, что контроль изменяющихся при этом магнитных свойств изделий может осуществляться с помощью магнитодинамического метода. При этом используются серийно выпускаемые толщиномеры покрытий МТЦ-3 [3, 4], основанные на регистрации изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей стальной наконечник стержневого магнита, при его контакте и затем удалении от ферромагнетика. Величина возникающей в катушке ЭДС, измеряемой в режиме безразмерных единиц, является функцией намагниченности контролируемого материала в прилегающей к окончанию наконечника информативной области. Энергия магнита, выполненного из высококоэрцитивного материала NdFeB, составляет около 45 мДж, что позволяет формировать в поверхностном слое изделия достаточно сильные магнитные поля и обеспечивать высокую чувствительность измерений.

В работе выполнены исследования по толщинометрии немагнитных покрытий на основаниях из пластически деформированной аустенитной стали 12Х18Н10Т с помощью магнитодинамического метода.

Из стального листа толщиной 10 мм, находившегося в состоянии поставки, были вырезаны квадратные образцы 21×21 мм². Затем путем многократной прокатки при комнатной температуре во взаимно перпендикулярных направлениях была обеспечена разная степень их пластической деформации. Степень пластической деформации ε образцов определялась как изменение (в процентах) их толщины после деформирования относительно начальной. При проведении исследований эти образцы использовались в качестве оснований, на которые накладывались немагнитные покрытия в виде полимерных пленок и пластинок различной толщины. Для выполнения работы использовался магнитодинамический толщиномер МТЦ-3-2 [4].

На рис. 1 приведена зависимость сигнала толщиномера МТЦ-3-2 от степени пластической деформации образца. Наблюдается рост показаний магнитодинамического прибора с увеличением степени деформации образцов, связанный с активным образованием в них при этом магнитной фазы.

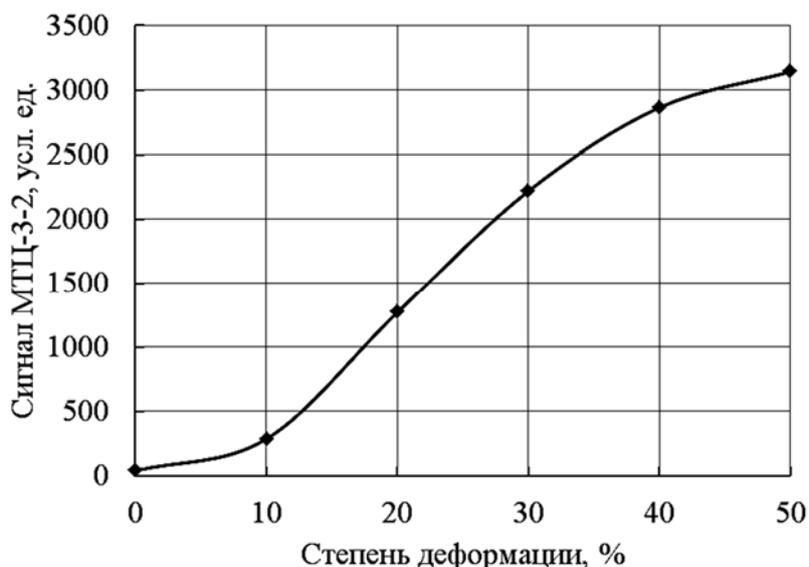


Рис. 1. Зависимость сигнала толщиномера МТЦ-3-2 от степени пластической деформации основания без покрытия

На рис. 2, а представлены зависимости сигнала толщиномера МТЦ-3-2 от толщины покрытия при степенях пластической деформации основания ε от 0 % до 50 %. На рис. 2, б изображены кривые для $\varepsilon = 0$ % и $\varepsilon = 10$ % в укрупненном масштабе.

Согласно рис. 2, зависимости сигналов толщиномера МТЦ-3-2 от толщины покрытия при разных степенях пластической деформации ε представляют собой смещенные относительно друг друга непересекающиеся кривые, которые могут быть использованы в качестве градуировочных при толщинометрии. Чувстви-

тельность измерений оказывается высокой как в случаях высокой концентрации магнитной фазы, так и в случаях ее небольшого наличия. Для выбора градуировочной кривой необходимо выполнить предварительное измерение сигнала толщиномера на материале изделия без покрытия, установив таким путем, какая точка кривой рис. 1 имеется в качестве нулевой. Соответствующая ей кривая из рис. 2 и должна использоваться при дальнейшей толщинометрии.

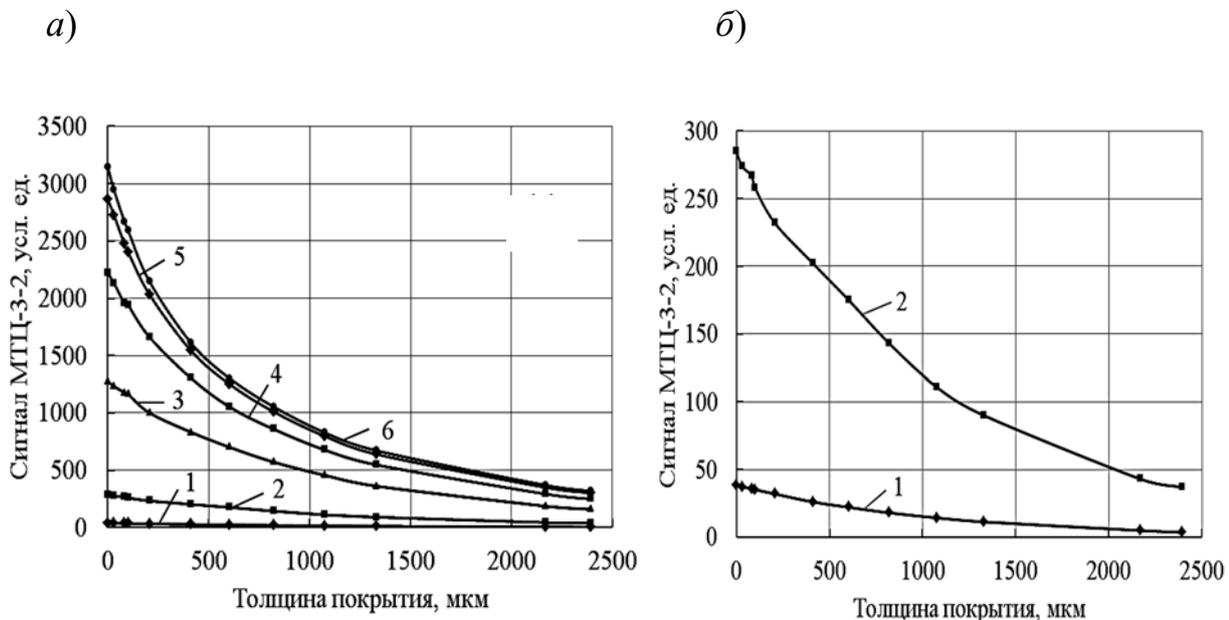


Рис. 2. Зависимости сигнала толщиномера МТЦ-3-2 от толщины покрытия при разных степенях пластической деформации ε , %, основания: а – 1 – 0 %; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 30 %; 5 – 40 %; 6 – 50 %; б – 1 – 0 %; 2 – 10 %

Рассмотрена возможность получения общей зависимости, используемой при разных степенях пластической деформации. Для этого все кривые рис. 2 приводятся к виду, при котором их значения на основании без покрытия имеют одинаковую величину. Это может быть достигнуто умножением всех значений каждой кривой на индивидуальный коэффициент, определяемый путем деления выбранного единого значения по оси ординат (см. рис. 1) на полученную для данной зависимости и отмеченную по этой же оси величину сигнала толщиномера МТЦ-3-2.

На рис. 3 изображены с умножением на найденные коэффициенты все кривые рис. 2. Из соображений минимизации погрешностей в качестве единого значения, к которому приводились все измерения на основаниях без покрытий, выбран сигнала толщиномера, полученный на основании без покрытия с максимальной исследованной пластической деформацией $\varepsilon = 50\%$.

Согласно рис. 3, в результате проведенных действий не удалось получить полного слияния представленных на рис. 2 зависимостей, однако имеет место существенное сближение полученных кривых, одна из которых (например, при $\varepsilon = 20\%$ или $\varepsilon = 30\%$) может быть выбрана в качестве общей градуировки.

Это позволяет осуществлять с удовлетворительной точностью толщинометрию немагнитных покрытий на стали 12Х18Н10Т без привлечения конкретных зависимостей, полученных по измерениям на наборе пленок различной толщины, накладываемых на основания с разной степенью деформации. Для получения более низких погрешностей при осуществлении контроля в условиях конкретного производства можно, имея информацию о порядке реальных напряжений в структуре изделия, взять в качестве основы для градуировки одну из кривых, характерных для определенных групп степеней деформации. Так, при небольших механических воздействиях это может быть зависимость измеряемого сигнала от толщины покрытия (см. рис. 2) для $\varepsilon = 0\%$, при близких к максимальным воздействиях – для $\varepsilon = 40\%$.

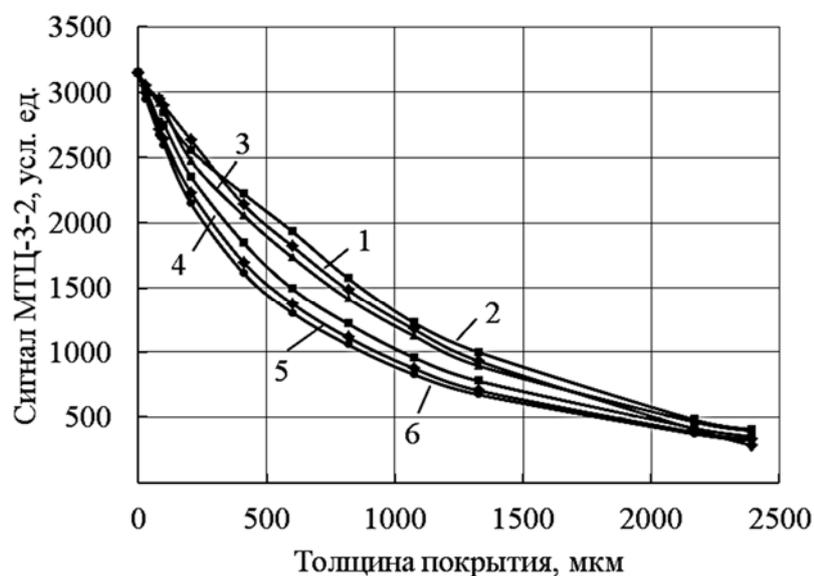


Рис. 3. Приведенные к единому значению на основании без покрытия зависимости сигналов толщинометра МТЦ-3-2 от толщины покрытия при разных степенях пластической деформации ε , %, основания: 1 – 0 %; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 30 %; 5 – 40 %; 6 – 50 %

Таким образом, в результате измерений зависимости сигнала толщинометра МТЦ-3-2 от толщины немагнитных покрытий на основаниях из подвергнутой разным степеням пластической деформации стали 12Х18Н10Т показано, что по величине сигнала на основании без покрытия можно определить степень его пластической деформации. На базе этой информации осуществляется выбор градуировочной кривой для определения толщины немагнитного покрытия на данном основании. При определенных условиях возможно создание общей градуировочной кривой. Методика ее построения предполагает сначала измерение сигнала толщинометра МТЦ-3-2 на выбранном основании без покрытия с величиной ε , примерно соответствующей условиям конкретного промышленного производства. Затем осуществляется деление его на величину сигнала толщинометра, измеренную на подлежащем контролю изделии без покрытия

(то есть с неизвестной величиной ϵ). В результате определяется коэффициент, на который в дальнейшем производится умножение всех результатов измерений на данном основании с нанесенными на него покрытиями.

При практическом использовании градуировочная кривая может быть построена при наложении покрытий различной толщины на изделие с наиболее часто встречающимся уровнем структурных напряжений. Для вычисления необходимых далее коэффициентов используется сигнал прибора, полученный на этом изделии перед нанесением покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние деформации прокаткой и одноосным растяжением на структуру, магнитные и механические свойства армко-железа, стали 12X18H10T и составного материала «сталь 12X18H10T – армко-железо – сталь 12X18H10T» / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 16–30.

2. **Шарандо, В. И.** Использование магнитодинамического и термоэлектрического методов контроля при изучении процесса пластического деформирования стали 12X18H10T / В. И. Шарандо, А. В. Чернышев, Н. В. Кременькова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. – Могилев, 2021. – С. 310–311.

3. **Лухвич, А. А.** Магнитные толщиномеры нового поколения / А. А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 3–15.

4. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/lab1/products/>. – Дата доступа: 14.07.2022.

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

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Сборник статей 8-й Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 29–30 сентября 2022 года)

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

Корректоры *И. В. Голубцова, А. А. Подошевка,
Т. А. Рыжикова*

Компьютерный дизайн *Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 16.09.2022. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 17,90. Уч.-изд. л. 19,13. Тираж 20 экз. Заказ № 809.

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, г. Могилев.