

Учредители: Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Международная ассоциация «Сварка» (издатель)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

О. И. Бойчук, Э. Ф. Гарф,

Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,

Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),

Ю. Н. Посыпайко, В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),

Е. В. Шаповалов

ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина

В. А. Стрижало

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

В. Л. Венгринович

Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Казакевич

Ин-т физической химии, Киев, Украина

О. М. Карпаш

Ив.-Франк. нац. техн. ун-т нефти и газа, Украина

В. В. Клюев

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

Н. В. Новиков

Ин-т сверхтвердых материалов, Киев, Украина

Г. И. Прокопенко

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

С. К. Фомичов

НТУУ «Киев. полит. ин-т им. Игоря Сикорского», Киев

М. Г. Чаусов

Нац. ун-т биорес. и природопольз. Украины, Киев

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

ул.Казимира Малевича, 11

г. Киев-150, 03680, Украина

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

Л. Н. Герасименко,

Н. А. Питула (отв. секретарь),

Д. И. Середа, Т. В. Юштина

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

Журнал входит в перечень
утвержденных МОН Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

СОДЕРЖАНИЕ

Украинско-китайское научно-техническое сотрудничество..... 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ГУСЕВ А. П., ШУКЕВИЧ Я. И., ЛУКЬЯНОВ А. Л. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и диаметра прутков арматуры строительных конструкций..... 5

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., БОЙЧУК О. И. Результаты исследования волноводов..... 11

МИЛЕНИН А. С. Методы прогнозирования докритического разрушения конструкционных материалов под действием циклических нагрузок (обзор)..... 16

ТРОИЦКИЙ В. А., МИХАЙЛОВ С. Р., ПАСТОВЕНСКИЙ Р. О. X-ray mini технология контроля на основе твердотельных плоскопанельных детекторов..... 25

ХОХЛОВА Ю. А., ИЩЕНКО Д. А., ХОХЛОВ М. А. Индентирование от макро- до нанометрового уровня и примеры исследования свойств материалов с особой структурой 30

МУРАВСКИЙ Л. И., ВОРОНЯК Т. И., ИВАНИЦКИЙ Я. Л., ДЖАЛА В. Р., КУЦЬ А. Г. Принципы построения аппаратно-программного комплекса для неразрушающего контроля композитных элементов конструкций авиакосмической техники 37

ГАЛАГАН Р. М., МОМОТ А. С. Реализация нейросетевых алгоритмов классификации технического состояния композиционных материалов по результатам акустического контроля..... 43

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ДАВЫДОВ Е. А., ДЯДИН В. П. Определение границ поврежденности монтажных сварных соединений генератора установки каталитического крекинга по результатам УЗ обследования..... 47

БАГЛАЙ А. В. Вибрационное обследование стана 1150 54

СУХОМЛИН В. И., ВОЛОХ В. И., ТАРАНЕНКО А. А. Применение коэрцитиметрического метода контроля при ремонте смесителя в доменном производстве 58

ИНФОРМАЦИЯ

8-я Национальная научно-техническая конференция и выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика – UkrNDT-2016»..... 61

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТК-78

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА і НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA і NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Виходить 4 рази на рік

Quarterly issue

Головний редактор Б. Є. Патон

Editor-in-Chief B. E. Paton

ЗМІСТ

CONTENTS

Українсько-китайське науково-технічне співробітництво..... 3

Ukrainian-Chinese scientific-technical cooperation 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

SCIENTIFIC-TECHNICAL

ГУСЕВ О. П., ШУКЕВИЧ Я. І., ЛУК'ЯНОВ А. Л. Магнітний метод визначення товщини захисного шару бетону і діаметра прутків арматури будівельних конструкцій..... 5

GUSEVA P., SHUKEVICH Ya. I., LUKIANOV A. L. Magnetic method for determination of the thickness of protective concrete layer and diameter of rebars of building structures 5

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., БОЙЧУК О. І. Результати дослідження хвилеводів 11

NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A., BOICHUK O. I. Results of waveguide investigations 11

МІЛЕНІН О. С. Методи прогнозування докритичного руйнування конструкційних матеріалів під дією циклічних навантажень (огляд) 16

MILENIN A. S. Methods of prediction of subcritical fracture of structural materials under the impact of cyclic loads (Review) 16

ТРОЇЦЬКИЙ В. О., МИХАЙЛОВ С. Р., ПАСТОВЕНСЬКИЙ Р. О. X-ray міні технологія контролю на основі твердотільних плоскопанельних детекторів 25

TROITSKII V. A., MIKHAILOV S. R., PASTOVENSKII R. O. X-ray mini testing technology based on solid plane-parallel detectors 25

ХОХЛОВА Ю. А., ІЩЕНКО Д. А., ХОХЛОВ М. А. Індентування від макро- до нанометрового рівня і приклади дослідження властивостей матеріалів з особливою структурою 30

KHOKLOVA Ju. A., ISHCHEENKO D. A., KHOKHLOV M. A. Indentation from macro- to nanometer level and examples of investigation of properties of materials with a special structure 30

МУРАВСЬКИЙ Л. І., ВОРОНЯК Т. І., ІВАНИЦЬКИЙ Я. Л., ДЖАЛА В. Р., КУЦЬ О. Г. Принципи побудови апаратно-програмного комплексу для неруйнівного контролю композитних елементів конструкцій авіакосмічної техніки 37

MURAVSKY L. I., VORONYAK T. I., IVANYTSKY Ya. L., DZHALA V. R., KUTS O. G. Principles for development of hardware-software complex for nondestructive testing of aircraft composite structural components 37

ГАЛАГАН Р. М., МОМОТ А. С. Реалізація нейронних алгоритмів класифікації технічного стану композиційних матеріалів за результатами акустичного контролю 43

GALAGAN R. M., MOMOTA S. Realization of neural network algorithms for classification of technical state of composite materials by acoustic testing results..... 43

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

INDUSTRIAL

ДАВИДОВ Є. О., ДЯДІН В. П. Визначення меж пошкодження монтажних зварних з'єднань регенератора установки каталітичного кренінга за результатами УЗ обстеження..... 47

DAVYDOV E. A., DYADIN V. P. Determination of damage limits in site welded joints of a regenerator in catalytic cracking unit by UT results 47

БАГЛАЙ А. В. Вібраційне обстеження стану 1150 54

BAGLAI A. V. Vibrational testing of slabbing mill 1150 54

СУХОМЛИН В. І., ВОЛОХ В. І., ТАРАНЕНКО А. О. Застосування коерцитиметричного методу контролю під час ремонту змішувача у доменному виробництві 58

SUKHOMLIN V. I., VOLOKH V. I., TARANENKO A. A. Application of coercimetric method of testing in repair of a mixer in blast-furnace production 58

ІНФОРМАЦІЯ

INFORMATION

8-а Національна науково-технічна конференція та виставка «Неруйнівний контроль та технічна діагностика: UkrNDT-2016»..... 61

8th National Scientific-Technical Conference and Exhibition «Nondestructive Testing and Technical Diagnostics: UkrNDT-2016» 61

Адреса редакції

03680, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11, Kazimir Malevich str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

УКРАИНСКО-КИТАЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

В начале января этого года исполнилось 25 лет со дня установления дипломатических отношений между Украиной и Китайской Народной Республикой. Одним из приоритетных направлений двусторонних отношений является сотрудничество в области науки и техники. Пример этому — давние и плодотворные связи украинских сварщиков с китайскими коллегами.



Во время встречи в ИЭС 16 февраля 2017 г. (слева направо: академик Б. Е. Патон, г-н Чжан Вэй, д-р техн. наук В. Н. Коржик)

«За 25 лет, прошедшие со дня установления дипломатических отношений между Украиной и Китайской Народной Республикой, были достигнуты значительные результаты в области научного и научно-технического сотрудничества между нашими странами, а сотрудничество в области электросварки и материаловедения вообще можно рассматривать как яркий пример взаимовыгодной двусторонней научной кооперации», — отметил президент Национальной академии наук Украины академик Борис Евгеньевич Патон во время визита первого секретаря Посольства КНР в Украине господина Чжан Вэй в Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Репортаж об этой встрече и интервью с директором Института академиком Б. Е. Патоном были опубликованы в одной из центральных китайских газет «Жэньминь жибао».

Сотрудничество Украины с Китаем в сфере электросварочных технологий имеет давнюю историю (например, в Харбине уже почти полвека действует «патоновская» установка для электрошлаковой сварки), но с подписанием в 2011 г. межправительственного соглашения и создания Комиссии по сотрудничеству между Правительством Украины и Правительством Китайской Народной Республики спектр направлений сотрудничества в значительной мере был расширен. В том же 2011 г. по инициативе Национальной академии наук Украины, Министерства науки и технологий КНР и Государственного управления по делам иностранных специалистов КНР в провинции Гуандун был официально открыт Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона.

Как отметил Б. Е. Патон, за годы существования совместного Китайско-украинского института сварки им. Е. О. Патона, созданного на основе научно-технической платформы — новой инновационной формы международного взаимодействия в сфере высоких технологий, обе страны получили уникальный и очень полезный опыт. Достигнутые за пять лет результаты он назвал достаточно успешными и «соответствующими не только интересам провинции Гуандун и Национальной академии наук Украины, но и Китая, и Украины в целом».

Реализация этого китайско-украинского проекта эффективно соединила технологические возможности Украины с рыночным спросом китайской стороны, а также активно способствовала воплощению в жизнь стремлений Китая к технологическим прорывам во многих ключевых отраслях экономики. В Китайско-украинском институте сварки им. Е. О. Патона не только удалось сконцентрировать самые прогрессивные знания и оборудование в области электросварки и материаловедения, но и сосредоточить усилия на создании инноваций в интересах нескольких различных отраслей. Это технологии и оборудование для контактной сварки трубопроводов и арматуры, которые открывают новые возможности в строительстве железобетонных мостов, путепроводов и автомагистралей. Это также способы соединения алюминиевых сплавов, используемых при строительстве судов специального назначения, в авиации и космонавтике. Кроме того, это технологии восстановления деталей с применением скоростного плазменного напыления для текстильной промышленности, полиграфии и др. Весомые результаты были достигнуты и при выполнении крупных научных проектов в сфере океанографического инжиниринга, а также при изготовлении оборудования для атомных электростанций и применения сварочных технологий в медицине. Вследствие эффективного сотрудничества сварочные технологии, используемые в Китае, в значительной мере были улучшены и оптимизированы до передового международного уровня.

Содиректор Китайско-украинского института сварки им. Е. О. Патона с украинской стороны доктор технических наук Владимир Коржик, который работает в этом проекте с самого начала, сообщил, что в Институте за эти годы выполнялось более 30 научно-исследовательских программ государственного и регионального уровня, услуги по распространению и технической поддержке технологий были предоставлены более 100 предприятиям. По результатам проведенных работ опубликовано более 300 научных статей и монографий, получено 56 патентов.

В последнее время активно развивается сотрудничество с такими мощными китайскими промышленными концернами, как Китайская корпорация аэрокосмической науки и техники (China Aerospace Science and Technology Corporation — CASC), Корпорация авиационной промышленности Китая (Aviation Industry Corporation of China — AVIC), Китайская государственная судостроительная корпорация (China State Shipbuilding Corporation — CSSC), металлургическая компания Anshan Iron and Steel Group, корпорация Dongfang Electric Machinery.

Кроме того, на протяжении всех лет своей деятельности Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона много внимания уделял развитию фундаментальных научных исследований, всячески поддерживал академический обмен между нашими странами. Среди организованных Институтом научных мероприятий можно назвать семинар по сварочным технологиям в океанографической инженерии, семинар по ключевым технологиям полярного судостроения и др.

Деятельность Института была отмечена 15 наградами провинции Гуандун, премиями профильных министерств и ведомств. За значительный вклад в процесс модернизации Китая и развитие научно-технического сотрудничества между Китаем и Украиной в 2012 г. академик Б. Е. Патон, а в 2014 г. Владимир Коржик были удостоены высшей и самой авторитетной правительственной награды для иностранных специалистов — ордена Дружбы Китайской Народной Республики.

В завершение встречи академик Б. Е. Патон отметил, что украинские ученые высоко оценивают разработанную китайским правительством стратегию «Китайское производство – 2025». По его мнению, эта стратегия будет способствовать скорейшему превращению Китая в глобальное промышленно развитое государство, а развитие сварочных технологий как основы для производства специализированного оборудования получит новый мощный импульс для дальнейшего развития. В частности, он выразил надежду на углубление сотрудничества в области сварки живых тканей в интересах клинической медицины.

МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА И ДИАМЕТРА ПРУТКОВ АРМАТУРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

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

Ин-т прикладной физики НАН Беларуси. 220072, г. Минск-72, ул. Академическая, 16. E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

Предложен магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и диаметра прутков арматуры железобетонных строительных конструкций. Компьютерным моделированием получено распределение намагниченности в стальном прутке и экспериментально исследовано распределение напряженности магнитного поля рассеяния прутка при локальном намагничивании полем постоянного магнита в зависимости от диаметра прутка и от его расстояния до магнита. Показано, что преобладающий вклад в поле рассеяния прутка при малых размерах магнита вносит продольная составляющая его намагниченности, характеризующаяся соосными противоположно направленными диполями. Предложенный метод основан на измерении напряженности магнитного поля рассеяния прутка одновременно в двух точках над поверхностью контролируемого объекта в зоне намагничивания прутка и использовании градуировочной сетки, построенной по зависимостям поля рассеяния прутка от двух определяемых параметров. Показана методика построения градуировочной сетки измерительного прибора для контроля железобетонных строительных конструкций. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: магнитный метод контроля, защитный слой бетона, диаметр прутков арматуры

В основу работы существующего магнитного и электромагнитного методов неразрушающего контроля (НК) железобетонных строительных конструкций [1–3] положен принцип воздействия на контролируемый объект (КО) постоянным или переменным магнитным полем и измерения характеристик магнитного поля рассеяния прутков арматуры. Данный принцип использован в ряде известных разработок для контроля толщины защитного слоя бетона и диаметра прутков арматуры, например: Profometer PM-600 [4] и PM-630/650 [5]; Elcometer Protovale 331 [6]; Profoskope [7]; ИПА-МГ4 [8]; Rebar Locator TC100/TC110 [9] и др.

Применение по назначению существующих измерителей сопряжено с выполнением ряда условий, наиболее существенным из которых является необходимость использования проектной документации на КО для получения информации о диаметре прутков арматуры при необходимости контроля толщины защитного слоя бетона или о толщине защитного слоя бетона при необходимости измерения диаметра прутков арматуры [3]. Данные условия применения существующих измерителей являются следствием использования однопараметровых методов измерений характеристик магнитного потока, связанного с КО.

Более полным решением проблемы получения информации об интересующих параметрах строительных конструкций является разработка двухпараметрового метода, принцип действия которого может быть основан на измерении характеристик

распределения напряженности магнитного поля рассеяния прутков арматуры над поверхностью КО. Физическим обоснованием метода может служить различие зависимостей пространственного распределения магнитного поля прутков от их диаметра и от расположения в намагничивающем поле. С целью изучения возможности реализации двухпараметрового метода в настоящей работе выполнено исследование особенностей пространственного распределения напряженности магнитного поля рассеяния стальных прутков в связи с намагничиванием их неоднородным полем магнита в зависимости от диаметра прутков и от расстояния между прутком и магнитом.

Модель и методика исследования. Метод исследования – компьютерное моделирование и экспериментальное исследование характеристик магнитного поля. Особенностью исследуемой модели является использование локального однополюсного намагничивания прутка, так как двухполюсное намагничивание – это комбинация двух однополюсных. Исследуемая модель, представленная на рис. 1, содержит намагничивающую систему I из двух постоянных магнитов и цилиндрический ферромагнитный пруток 2. Магниты расположены симметрично относительно начала координат с небольшим зазором между ними, позволяющим выполнить измерения поля рассеяния вдоль осей ox и oz . Вектор намагниченности M_0 магнитов направлен в одну сторону параллельно оси oz . Пруток диаметром d расположен в плоскости yoz параллельно оси oy на расстоянии от начала координат $|z| = h$.

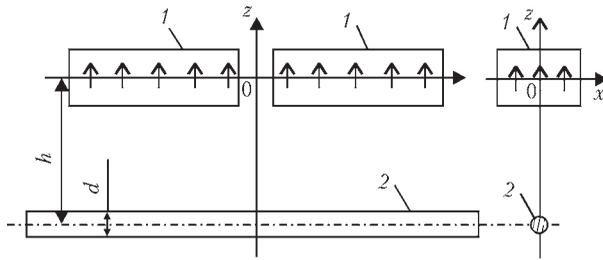


Рис. 1. Исследуемая модель: 1 – магниты; 2 – пруток

В общем случае характеристики магнитного поля рассеяния намагничиваемого тела определяются, как известно, параметрами намагничивающего поля, магнитными свойствами материала тела, его формой и расположением в намагничивающем поле.

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

$$\vec{H} = -\Delta V_m, \nabla(\mu_0 \mu \vec{H}) = 0, \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (1)$$

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

В качестве расчетной области пространства, внутри которой размещалась моделируемая система, был взят куб с длиной ребра в пять раз большей, чем длина намагничивающей системы, что обеспечивало достаточную точность моделирования полей. Граничным условием на внешних границах области принято условие $\vec{n}\vec{B} = 0$, где \vec{n} – вектор нормали к поверхности.

Принятое в расчетах значение намагниченности \vec{M}_0 постоянных магнитов, входящей в соотношение $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}_0)$, равно 950000 А/м, что является типичным для материала Nd-Fe-B. Задача нахождения h и d по распределению напряженности \vec{H} поля рассеяния прутка относится к классу обратных задач. Для ее решения использован метод градуировки, т. е. через решения ряда прямых задач. Пруток по исследуемой модели намагничивается локально неоднородным полем \vec{H}_0 постоянных магнитов, образуя в окружающем пространстве вторичное магнитное поле, характеристики которого определяются параметрами намагничивающего поля, параметрами прутка и его расположением относительно намагничивающей системы. В общем виде это можно представить выражением:

$$\vec{H}_1 = f(\vec{H}_0, \mu, d, h, x, y, z), \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость материала прутка; h – расстояние от начала координат до оси

прутка; d – диаметр прутка; x, y, z – координаты точки наблюдения.

Для упрощения решения задачи полагаем $\mu = \text{const}$.

Исследование характеристик магнитного поля рассеяния и особенностей намагничивания прутков неоднородным полем магнитов выполнено в зависимости от параметров h и d . Результаты расчетов представлены для близких к реальным значениям: $h = 0,04; 0,06; 0,08$, и $0,1$ м; $d = 0,005; 0,01; 0,015$ и $0,02$ м.

Результаты расчетов и их обсуждение. На рис. 2 представлено распределение осевой $H_{\text{вн } y}$ и радиальной $H_{\text{вн } z}$ составляющих напряженности внутреннего магнитного поля на оси прутка для двух значений параметров h и d при длине (вдоль оси oy) двух магнитов $L = 0,16$ м.

Из рисунка видно, что величина составляющей $H_{\text{вн } y}$ в случаях a и b существенно больше, чем составляющей $H_{\text{вн } z}$. Для приведенных диаметров прутков отношение максимальных значений осевой и радиальной составляющих находится в диапазоне 10...40, в связи с чем основные характеристики поля рассеяния прутка при указанном соотношении L и h определяются его продольным намагничиванием. Характерной особенностью продольного намагничивания, как видно из графиков, является более сильное $H_{\text{вн } y}$ тонкого

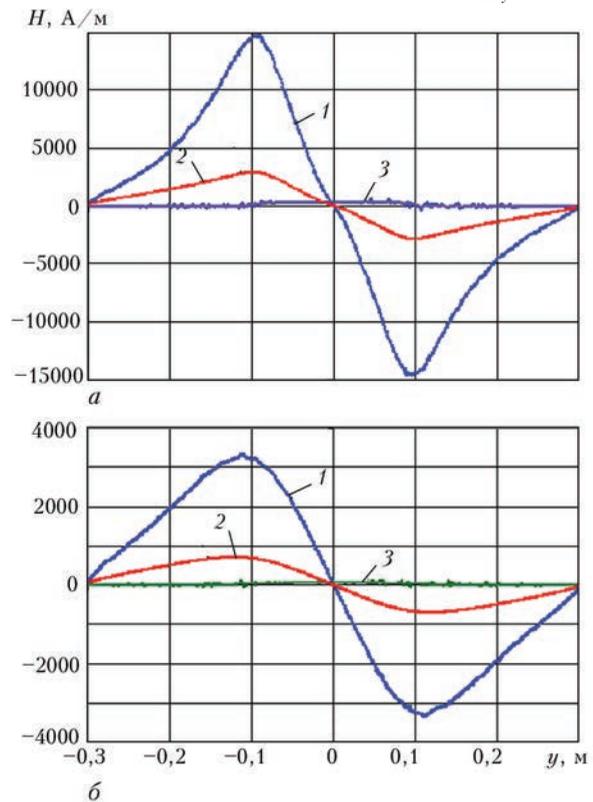


Рис. 2. Распределение продольной $H_{\text{вн } y}$ и поперечной $H_{\text{вн } z}$ составляющих напряженности внутреннего магнитного поля на оси прутка: $a - h = 0,04$ м ($1 - H_{\text{вн } y}$ ($d = 0,005$ м); $2 - H_{\text{вн } y}$ ($d = 0,02$ м); $3 - H_{\text{вн } z}$ ($d = 0,005$ м; $0,02$ м); $b - h = 0,1$ м ($1 - H_{\text{вн } y}$ ($d = 0,005$ м); $2 - H_{\text{вн } y}$ ($d = 0,02$ м); $3 - H_{\text{вн } z}$ ($d = 0,005$ м; $0,02$ м)

прутка в сравнении с толстым при одинаковом их расположении относительно магнитов. Это противоречит тому, что при одинаковом расположении прутков они находятся в одинаковом намагничивающем поле и должны иметь одинаковое внутреннее из-за непрерывности тангенциальной составляющей напряженности. Данное кажущееся противоречие снимается, если учесть наличие размагничивающего фактора, определяемого в данном случае соотношением диаметра прутка и длины его намагничиваемого участка. Для тонкого прутка отношение данных величин существенно меньше, чем для толстого, в связи с чем напряженность намагничивающего поля в толстом прутке снижается размагничивающим полем сильнее, чем в тонком. В пользу приведенного объяснения кажущегося противоречия свидетельствуют также расчетные данные по составляющей $H_{вн z}$. Так как размагничивающий фактор круглого прутка в поперечном направлении не зависит от его диаметра, то значение размагничивающего поля в толстом и тонком прутках должно быть одинаковым. Данное заключение подтверждено рис. 2, где распределение поперечной составляющей $H_{вн z}$ напряженности внутреннего поля (кривые 3) для тонкого и толстого прутков практически совпадают.

Необходимо отметить, что использование понятия о размагничивающем факторе в приведенном варианте является весьма условным, так как строгая формулировка этого понятия относится к намагничиванию тела ограниченных размеров в однородном поле [10]. При намагничивании в неоднородном поле условия для возникновения намагниченности материала несколько иные в связи с тем, что замкнутые внутри тела магнитные потоки могут существенно влиять на распределение намагниченности в его объеме [11].

Составляющая $H_{вн y}$ по обе стороны от точки $y = 0$ (см. рис. 2) имеет различный знак, т. е. намагниченность прутка в этих областях характеризуется двумя соосными, направленными в противоположные стороны, магнитными диполями. Следовательно, магнитное поле рассеяния H_x , формируемое преимущественно этими диполями, будет иметь зеркальную (при используемом в исследуемой модели способе намагничивания) относительно плоскости xoz симметрию пространственного распределения напряженности.

Кроме изложенного, следует отметить различие зависимостей распределения $H_{вн y}$ от параметров h и d . Расстояние Δy_3 по оси абсцисс между экстремумами кривых на рис. 2, *a* больше, чем на рис. 2, *б*, т. е. с увеличением расстояния h между магнитом и прутком соосные диполи смещаются от центра в противоположные стороны. При этом величина изменения расстояния Δy_3 не зависит от

диаметра прутка, в то время как значение $|H_{вн y}|$ зависит от двух параметров h и d .

Так как характер поля рассеяния прутка определяется его намагниченностью, то полученные особенности зависимости $H_{вн}$ от параметров h и d должны быть справедливы и для поля рассеяния.

С целью проверки результатов расчета выполнены экспериментальные исследования распределения напряженности магнитного поля рассеяния прутков арматуры в области пространства при $z \geq 0$. При этом расположение магнитов и прутков соответствует рис. 1. Измерения выполнены на автоматизированной установке с программным управлением. Значения диаметра прутков d в эксперименте изменялись в пределах 4...22 мм, расстояние h от оси прутка до центра магнитов – в диапазоне 20...60 мм. Значения напряженности поля рассеяния прутков определялись по разности результатов двух измерений: измерение поля магнитов в отсутствие прутка и измерение суммарного поля при наличии прутка.

Результаты эксперимента и их обсуждение. На рис. 3 представлено распределение по оси ox составляющей $H_x(x, d, h)$ напряженности магнитного поля рассеяния прутков различного диаметра, располагавшихся на двух расстояниях h от намагничивающей системы: *a* – 29 мм, *б* и *в* – 40 мм. При этом в случаях *a* и *б* прутки находятся в поле двух магнитов, в случае *в* – в поле шести таких же магнитов, расположенных вдоль оси OY . Длина намагничивающей системы в этом случае больше в три раза по сравнению с вариантами *a* и *б*.

Как видно из рис. 3, графики функции $H_x(x, d, h)$ по форме подобны: при $x = 0$ во всех случаях $H_x = 0$, с удалением от точки $x = 0$ значения $|H_x|$ возрастают и проходят через экстремумы, далее уменьшаются. Подобие графиков определяется одинаковой формой намагничиваемого тела в представленных вариантах и одинаковой его ориентацией относительно намагничивающей системы. Кроме подобия графиков на рис. 3, видны и различия между ними, связанные с зависимостью H_x от параметров h и d . Расположение экстремальных точек x_3 на оси абсцисс, в которых H_x имеет экстремум, в каждом варианте не зависит от значения d (в пределах погрешности эксперимента), но зависит от h , что видно при сравнении вариантов *a* и *б*, в которых расстояния h равны 29 и 40 мм соответственно. Это значит, что распределение напряженности поля рассеяния прутка определяется лишь его положением в поле магнитов, чем подтверждаются выводы на основе расчетных данных по внутреннему полю в прутке.

Аналогичное смещение экстремумов H_x от центра намагниченной области имеется не только при увеличении h , но и при увеличении длины L намагничивающей системы.

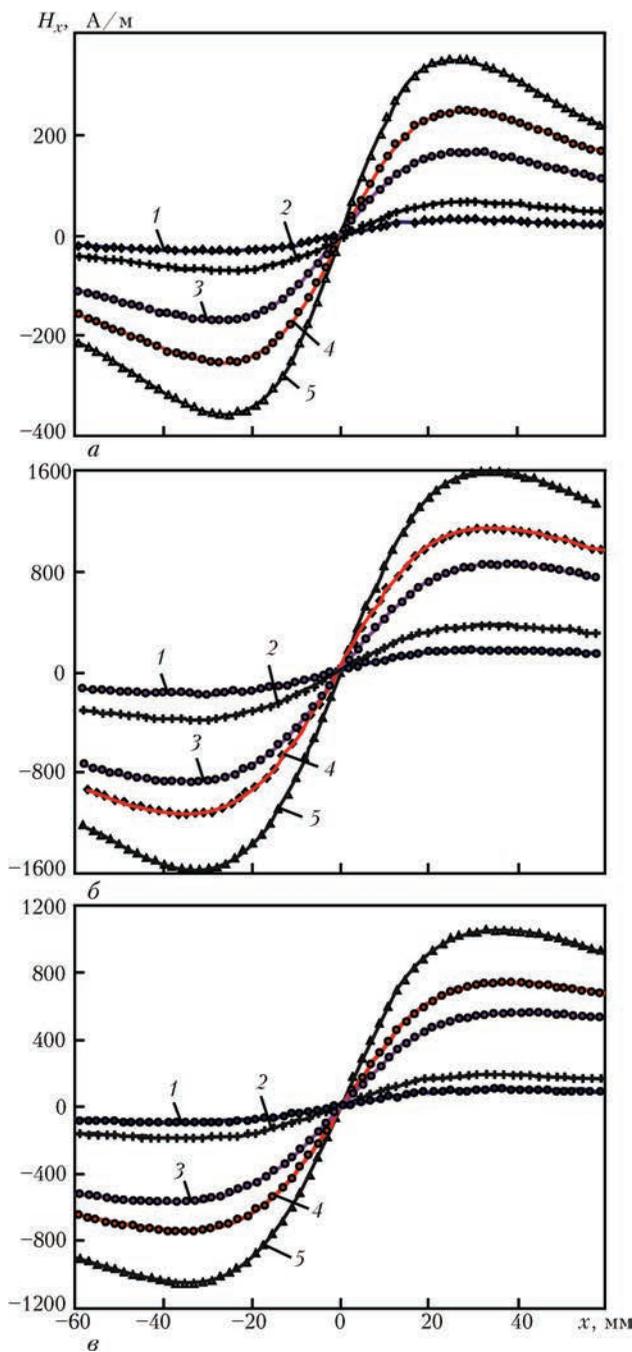


Рис. 3. Распределение составляющей H_x напряженности магнитного поля прутков по оси ox при различных значениях h ($a - 29$; $б - 40$; $в - 40$ мм) и следующих диаметрах прутков: 1 - 4; 2 - 6,5; 3 - 11,4; 4 - 16; 5 - 22 мм

Сравнивая графики на рис. 3, б и в, полученные для различной длины L намагничивающей системы, видим, что максимальное значение $|H_x|$ в варианте в меньше, чем в варианте б. Уменьшение напряженности \vec{H} магнитного поля рассеяния прутка при увеличении количества магнитов не соответствует увеличению напряженности \vec{H}_0 намагничивающего поля. Данное несоответствие связано с тем, что изменение составляющих H_{Oz} и H_{Oy} при увеличении L различным образом влияет на намагниченность прутка. С увеличением составляющей H_{Oz} растет и составляющая $|H_{вн z}|$

внутреннего поля, а также происходит увеличение намагничиваемого этой составляющей объема металла в области между соосными диполями. Увеличение вследствие этого напряженности поля рассеяния прутка не является столь существенным в сравнении с изменениями \vec{H} под влиянием $H_{вн y}$ из-за большого размагничивающего фактора прутка в поперечном направлении. Изменения составляющей $H_{вн y}$ при увеличении L характеризуются некоторым ростом напряженности и пропорциональным росту L увеличением расстояния между соосными диполями. Последнее приводит к существенному снижению напряженности поля рассеяния в области между диполями, что и наблюдается на графиках рис. 3, б, в.

Из выполненного анализа расчетных и экспериментальных данных следует возможность определения толщины защитного слоя бетона железобетонных конструкций по распределению напряженности магнитного поля рассеяния прутков арматуры без использования информации об их диаметре из проектной документации. Однако необходимость выполнения измерений пространственного распределения магнитного поля при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений является непростой задачей.

С целью упрощения данной задачи и рассмотрения возможности реализации двухпараметрового метода (одновременного определения h и d) для градуировки измерительного прибора можно использовать метод сеток, основанный на различии зависимостей поля рассеяния \vec{H} от параметров h и d . В этом случае, при заданном источнике намагничивающего поля и выбранной точке определения напряженности магнитного поля прутка, неизвестными в формуле (2) остаются два параметра – h и d . Очевидно, что для определения этих параметров необходимо, по меньшей мере, два взаимосвязанных уравнения, в которых неизвестными выступают указанные параметры. Систему из двух уравнений обеспечивают результаты расчетов (или измерений) значений \vec{H} в двух точках пространства в области намагниченного участка прутка. В общем виде система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \vec{H}_1 &= f(\vec{H}_0, \mu, d, h, x_1, y_1, z_1), \\ \vec{H}_2 &= f(\vec{H}_0, \mu, d, h, x_2, y_2, z_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Условие выбора координат точек: значения напряженности магнитного поля в этих точках должны различаться ($\vec{H}_1 \neq \vec{H}_2$), а напряженность поля – достаточна для измерений.

Метод построения градуировочной сетки для определения диаметра прутка и расстояния до магнита. Магнитное поле рассеяния \vec{H} намагниченного прутка является суммарным полем рассе-

Таблица 1. Расчетная зависимость от параметров d и h составляющей H_z напряженности поля рассеяния (А/м) в точках 1 и 2

Расстояние от начала координат $h, \text{ м}$	Диаметр прутка $d, \text{ мм}$							
	5		10		15		20	
	H_{z1}	H_{z2}	H_{z1}	H_{z2}	H_{z1}	H_{z2}	H_{z1}	H_{z2}
0,04	5466	1719	11578	3405	16443	4507	21948	5436
0,06	1930	956	4037	1973	5747	2694	7347	3307
0,08	775	486	1636	1017	2254	1422	2932	1775
0,10	350	250	747	537	1057	748	1332	940

нения всех его частей, соотношение составляющих \vec{M}_x, \vec{M}_y и \vec{M}_z намагниченности в которых изменяется в зависимости от параметров h и d различным образом, следствием чего является различие зависимостей H_1 и H_2 от h и d . Иллюстрацией данного положения могут служить численные данные значений H_z (табл. 1), полученные расчетами в точках 1 ($x = y = z = 0$) и 2 ($x = 0,05 \text{ м}, y = z = 0$), представленные в табл. 1.

Из таблицы видно, что значение H_z при изменении h от 0,04 до 0,1 м изменяется в точке 1 примерно в 15,5 раза, а в точке 2 – в среднем в 6,3 раза; при изменении d от 5 до 20 мм значение H_z в точке 1 изменяется в среднем в 3,85 раза, в точке 2 – в среднем в 3,4 раза. При этом с увеличением h величина H_z уменьшается, с увеличением d возрастает. На основе результатов, приведенных в табл. 1, можно построить зависимость $\vec{H}_1 = f(\vec{H}_2)$.

В графическом представлении каждая строка таблицы образует линию, вдоль которой изменяется d , но сохраняется неизменным значение h . Таких линий четыре, каждая будет соответствовать своему значению h . Линии, образованные парой соседних столбцов, соответствуют постоянному значению d при переменном h . Таких линий также будет четыре и каждая будет соответствовать определенному значению d . Очевидно, что линии первой серии (имеющие известные значения h) будут пересекаться с линиями второй серии (имеющими известные значения d), образуя сетку с четырехугольными ячейками. Таким образом, точки пересечения линий являются узлами сетки, в которых известны значения H_1, H_2, d и h . Следовательно, полученная сетка является аналогом градуировочной кривой при решении однопараметровых задач. Такую градуировочную сетку [12] можно построить как теоретически по расчетной модели, так и экспериментально, используя набор эталонных образцов. С помощью проградуированного подобным образом прибора, измеряющего величины H_1 и H_2 в двух выбранных точках, не составляет труда определить искомые параметры d и h исследуемого объекта.

В качестве примера практического построения градуировочной сетки по образцам прутков в табл. 2 приведены экспериментальные значения

Таблица 2. Зависимость от параметров d и h составляющей H_z напряженности поля рассеяния (А/м) в двух точках: 1 – $x = 0,02 \text{ м}, y = z = 0$; 2 – $x = 0,06 \text{ м}, y = z = 0$

$h, \text{ м}$	$d_1 = 12 \text{ мм}$		$d_2 = 16 \text{ мм}$	
	H_1	H_2	H_1	H_2
0,05	3434	1309	3735	1740
0,12	176	134	197	151

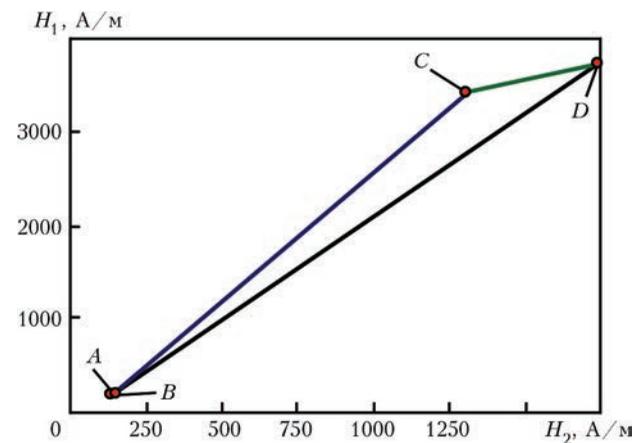


Рис. 4. Ячейка градуировочной сетки

H_z для построения ячейки. Ячейка, представленная на рис. 4, построена в координатной системе $\vec{H}_1 = f(\vec{H}_2)$.

На рисунке линия A–B соответствует значению $h = 0,12 \text{ м}$, линия C–D – значению $h = 0,05 \text{ м}$. Линия A–C соответствует значению d_1 , линия B–D – значению d_2 . Если в процессе контроля по измеренным значениям H_1 и H_2 точка на графике попадает в данную ячейку, то для определения значения d исследуемого образца можно использовать линию A–B или C–D, и для определения h – линии A–C или B–D.

Выводы

Показано, что зависимости как распределения напряженности внутреннего магнитного поля по длине прутка при намагничивании его постоянным магнитом, так и распределения напряженности поля рассеяния от величин d и h имеют различный характер: распределение напряженности поля определяется положением прутка и не зависит от его диаметра. Для одновременного определения значений величин h и d показана возможность применения двухпараметрового метода, основанного на измерении напряженности магнит-

ного поля рассеяния в двух точках пространства в зоне намагничивания прутка. Полученные особенности распределения поля в зависимости от величин d и h , а также от размеров магнита могут быть использованы для оптимизации намагничивающей системы и измерительной схемы применительно к конкретным условиям контроля параметров армирования железобетонных конструкций.

Список литературы

1. ГОСТ 22904–93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры.
2. EN 1520:2011. Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement.
3. Ульбин А. В. Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №1(27). – С. 4–13.
4. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-600.html>
5. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-630-650.html>
6. http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331_b.pdf
7. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profoscope.html?pqf=5>
8. <http://www.stroypribor.com/produkt/catalog/naprarm/>
9. <http://www.tgindt.com/products/concrete-testing-gauge/time-tc100-tc110-rebar-locator.html>
10. Аркадьев В. К. Магнитные коэффициенты формы, вещества и тела // Избранные труды. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 332 с.
11. Гусев А. П. Модели магнитных зарядов и потоков в задаче дефектоскопии с локальным намагничиванием // Дефектоскопия. – 2014. – № 6. – С. 46–53.
12. Магнитный метод контроля толщины слабомагнитных двухсторонних покрытий по немагнитному основанию / А. А. Лухвич и др. // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 75–82.

References

1. GOST 22904–93. Konstruktsii zhelezobetonnye. Magnitnyy metod opredeleniya tolshchiny zashchitnogo sloya betona i raspolozheniya armatury. [in Russian].
2. EN 1520:2011. Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement.
3. Ulybin A.V. Inspection methods of reinforcement parameters of concrete structures // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – №1 (27). P. 4–13. http://engstroy.spbstu.ru/eng/index_2012_01/ulybin.html
4. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-600.html>
5. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-630-650.html>
6. http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331_b.pdf
7. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profoscope.html?pqf=5>
8. <http://www.stroypribor.com/produkt/catalog/naprarm/>
9. <http://www.tgindt.com/products/concrete-testing-gauge/time-tc100-tc110-rebar-locator.html>
10. Arkadyev V. K. Magnitnye koeffitsiyenty formy, veshchestva i tela // Izbrannye trudy. – M.: Izd. AN SSSR, 1961. – 332 s. [in Russian].
11. Gusev A. P. Models of Magnetic Charges and Fluxes in the Problem of Flaw Detection with Local Magnetization // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – №6. – P. 343–349.
12. A Magnetic Method for Testing the Thickness of Two-Sided Weakly Magnetic Coatings by a Nonmagnetic Base / A. A. Lukhovich et al. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – №7. – P. 502–508

О. П. ГУСЕВ, Я. І. ШУКЕВИЧ, А. Л. ЛУК'ЯНОВ

Институт прикладной физики НАН Беларуси.
220072, м. Минск-72, вул. Академічна, 16.
E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

МАГНІТНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ЗАХИСНОГО ШАРУ БЕТОНУ І ДІАМЕТРА ПРУТКІВ АРМАТУРИ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Запропоновано магнітний метод визначення товщини захисного шару бетону і діаметра прутків арматури залізобетонних будівельних конструкцій. Комп'ютерним моделюванням отримано розподіл намагніченості в сталевому прутку і експериментально досліджено розподіл напруженості магнітного поля розсіювання прутка при локальному намагнічуванні полем постійного магніту в залежності від діаметра прутка і від його відстані до магніту. Показано, що переважний внесок у поле розсіювання прутка при малих розмірах магніту вносить складові складова його намагніченості, що характеризується співвісними протилежно спрямованими диполями. Запропонований метод ґрунтується на вимірюванні напруженості магнітного поля розсіювання прутка одночасно в двох точках над поверхнею контрольованого об'єкта в зоні намагнічування прутка і використанні градувальної сітки, побудованої по залежностям поля розсіювання прутка від двох визначених параметрів. Показана методика побудови градувальної сітки вимірювального приладу для контролю залізобетонних будівельних конструкцій. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: магнітний метод контролю, захисний шар бетону, діаметр прутків арматури

A. P. GUSEV, Ya. I. SHUKEVICH, A. L. LUKYANOV

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. 220072, Minsk, str. Academic, 16.
E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

MAGNETIC METHOD FOR DETERMINATION OF THE THICKNESS OF PROTECTIVE CONCRETE LAYER AND DIAMETER OF REBARS OF BUILDING STRUCTURES

A magnetic method of determination of the thickness of protective concrete layer and diameter of rebars of concrete building structures is proposed. Computer modeling was used to obtain the distribution of magnetization in a steel rod, and distribution of intensity of magnetic scattering field of the rod at local magnetization by a constant magnet field, depending on rod diameter and its distance to the magnet, was experimentally studied. It is shown that the longitudinal component of rod magnetization, which is characterized by coaxial oppositely directed dipoles, makes a prevailing contribution into the rod scattering field at small dimensions of the magnet. The proposed method is based on measurement of intensity of the rod scattering magnetic field simultaneously in two points above the controlled object surface in the zone of rod magnetization and application of a calibration grid, plotted by the dependencies of the rod scattering field on two determined parameters. A procedure of plotting a calibration grid of measuring instrument for monitoring concrete building structures is shown. 12 References, 2 Tables, 4 Figures.

Keywords: magnetic control method, protective layer of concrete, rebar diameter

Поступила в редакцию
12.12.2016

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОДОВ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, О. И. БОЙЧУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты исследований волн, проходящих по волноводам. Показаны два механизма передачи информации волноводу от контролируемой конструкции и связанные с этим особенности сигналов АЭ, распространяющихся по нему. Библиогр. 8, рис. 6.

Ключевые слова: волновод, контролируемая конструкция, сигналы акустической эмиссии

Одним из важных элементов в системах непрерывного мониторинга конструкций с применением АЭ технологии является конструкция промежуточных элементов, передающих информацию датчикам АЭ [1–3]. Это волноводы, устанавливаемые на поверхности конструкций для осуществления такой передачи в случае невозможности по тем или иным причинам прямого непосредственного крепления АЭ датчиков к поверхности контролируемой конструкции. Как правило, такими случаями являются конструкции, работающие при высоких температурах, где необходимо вынести датчики из зоны высоких температур или высоких температур и повышенной радиации. Конструкция волновода должна рассчитываться, прорабатываться должна также технология его крепления к поверхности изделия. Учитывая сложность обработки поступающей в компьютер информации, необходимо получить более точные методы расчета волноводов по сравнению с существующими элементарными методами расчета стержней с двигающимися по ним волнами. Последнее требует

более точной постановки задачи с более тщательной проработкой граничных и начальных условий воздействия перемещающейся по поверхности контролируемой конструкции волны на принимающий информацию рабочий торец волновода.

При решении такой задачи могут быть выделены два случая воздействия на рабочий торец волновода. Это случай, когда такое воздействие осуществляется на торец волновода, приваренного к поверхности конструкции, и случай его присоединения механическим путем (рис. 1). Механическое крепление волновода к поверхности конструкции может осуществляться в виде дозированно подпружиненного баяннетного замка (рис. 1, в). Разница в креплении волновода к поверхности приводит к различным условиям воздействия на его рабочий торец. В случае крепления с помощью сварки ввиду отсутствия зазора между торцом волновода и поверхностью конструкции передача информации происходит путем воздействия перемещения поверхности конструкции на его рабочий торец. В случае механическо-

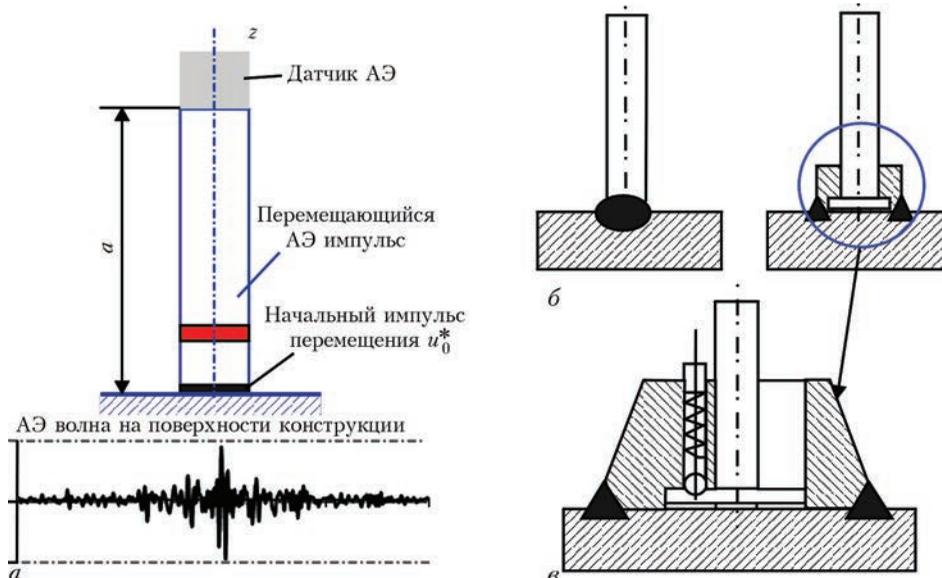


Рис. 1. Схема конструкции волновода (а) и способы его крепления к поверхности контролируемой конструкции (б), конструкция баяннетного замка для крепления волновода к поверхности изделия (в)

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук, 2017

го крепления и наличия, в связи с этим, зазора между двумя поверхностями, информация передается путем удара вертикально перемещающейся поверхности конструкции по свободному рабочему торцу волновода. В зависимости от того, каким способом прикреплен волновод, информация передается различными волнами, что необходимо учитывать при расчете волновода. Учитывая изложенное, рассмотрим два случая передачи информации на рабочий конец волновода.

Случай 1. В результате нагрузок на изделие пусть информация на рабочий торец волновода из вязкоупругого материала передается путем перемещения. В этом случае дифференциальное уравнение линейной задачи вязкоупругости в перемещениях может быть записано следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \beta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} u_0^* \delta(z) \delta(t), \quad (1)$$

где φ – функция перемещений, см²; C_1 – физическая константа, равная скорости перемещения волны в стержнях, см/с; β – вязкость материала волновода, с/см²; u_0^* – импульс начального перемещения, передаваемого торцу волновода поверхностью конструкции, см·с; ν – коэффициент Пуассона; z – координата; t – время; $\delta(z)$ и $\delta(t)$ – единичные дельта-функции Дирака.

Результатом решения данного дифференциального уравнения будут волны перемещений, распространяющихся вдоль волновода [4, 5]*:

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_0^* C_1 \omega_n}{a} \frac{e^{-\frac{\beta C_1^2 t}{2}}}{\sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}} \times \sin \left[C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2} \right] \cos\{\omega_n z\}$$

и

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_0^* C_1 \omega_n}{a} \frac{e^{-\frac{\beta C_1^2 t}{2}}}{\sqrt{\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2 - \omega_n^2}} \times \text{sh} \left[C_1 t \sqrt{\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2 - \omega_n^2} \right] \cos\{\omega_n z\},$$

если под корнем первой формулы появляется отрицательная величина. Здесь a – длина волновода

да, см; величины ω_n – суть положительные корни трансцендентного уравнения $\sin(\omega a) = 0$.

Начальные условия задачи предполагают начальное мгновенное воздействие перемещений двигающейся в вертикальном направлении поверхности пластины на рабочий торец волновода (рис. 1, а), а граничные – отсутствие напряжений на его свободном конце.

Передача информации от сложного импульса АЭ определяется путем суммирования воздействий от элементарных единичных импульсов, составляющих перемещающийся пакет АЭ (рис. 1, а).

Расчет по представленным формулам достаточно трудоемкий из-за слабой сходимости суммы ряда под знаком суммы, поэтому была создана специальная программа расчета, позволяющая достаточно быстро получать результаты счета.

Программа имеет возможность изменять параметры счета для получения их различных комбинаций. Формулы (1) и (2) обеспечивают счет для двух случаев. Исходные значения счета точно соответствуют приведенной в верхней рамке формуле. При переходе на счет к другому случаю в верхней части программы представляется формула, соответствующая выбранному случаю (рис. 2).

Анализируя графики (рис. 3), убеждаемся, что распространение АЭ волны в виде импульса осуществляется в достаточно широком диапазоне значений вязкости материала вплоть до значений βC_1 равных 0,1 см⁻¹ (в данном случае для удобства счета рассматривается условная величина вязкости βC_1 и времени $C_1 t$). При больших значениях βC_1 характер перемещений меняется. Так, при $\beta C_1 = 0,5$ см⁻¹ появляется пологая часть кривой распределения при приближении импульса к свободному торцу волновода. При еще больших значениях βC_1 , например, 1 импульс в графике распределения перемещений отсутствует. Распре-

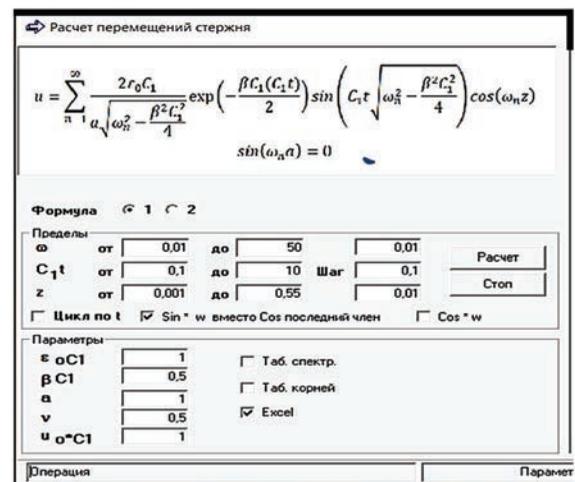


Рис. 2. Программа расчета перемещений импульса в волноводе в зависимости от принятых исходных параметров

*Решение получено методом интегральных преобразований дифференциального уравнения (1) по Лапласу [6] и конечным sin-преобразованием Фурье [7]

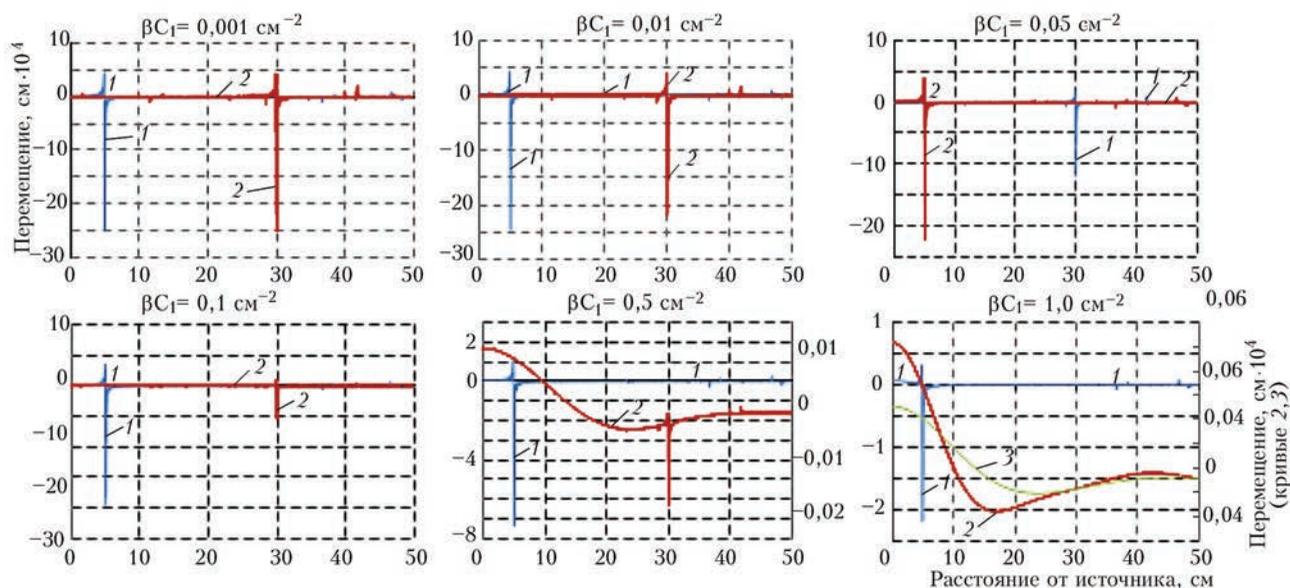


Рис. 3. Графики перемещений импульса АЭ по волноводу при различных значениях коэффициента вязкости материала волновода и времени: 1 – $C_1 t = 5$; 2 – 50; 3 – 60 см

деление перемещений становится плавным без выраженных всплесков.

Следует отметить еще одну особенность в количественных значениях перемещений на свободном конце волновода. За счет отсутствия напряжений на этой части волновода появляется отраженная волна противоположного знака, которая в значительной степени ослабляет подошедшую к этому торцу основную волну. Эффект получения полного сигнала основной волны может быть достигнут за счет наличия датчика АЭ, который как бы удлиняет волновод на свою длину. При этом предполагается, что основная волна рассеивается в АЭ датчике за счет его сложной формы. Математическое обеспечение измерительного оборудования в этом случае должно уметь выделять необходимую для дальнейшего анализа часть сигнала АЭ. На рис.4 показан случай с величиной сигнала АЭ на свободном торце волновода при отсутствии АЭ датчика и вариант, учитывающий прикрепленный к нему АЭ датчик. Как видно из

графика, величина подавления сигнала отраженным очень большая.

Случай 2. Во втором случае дифференциальное уравнение задачи может быть представлено в виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Здесь β как и ранее, коэффициент вязкости материала волновода, с/см^2 . Решением данного уравнения при граничных условиях $\varepsilon = \varepsilon_0^*$ на рабочем торце стержня и $\varepsilon = 0$ на его свободном конце после последовательного прямого и обратного преобразования Лапласа и конечного преобразования Фурье, будет [1–3]:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0^* C_1}{a \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2}{4}}} \exp\left(-\frac{\beta C_1^2}{2} t\right) \times \sin\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2}{4}}\right) \cos(\omega_n z).$$

Если $\omega_n^2 < \frac{\beta^2 C_1^2}{4}$, то

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0^* C_1}{a \sqrt{\frac{\beta^2 C_1^2}{4} - \omega_n^2}} \exp\left(-\frac{\beta C_1^2}{2} t\right) \times \text{sh}\left(C_1 t \sqrt{\frac{\beta^2 C_1^2}{4} - \omega_n^2}\right) \cos(\omega_n z);$$

ω_n – положительные корни трансцендентного уравнения $\sin(\omega a) = 0$.

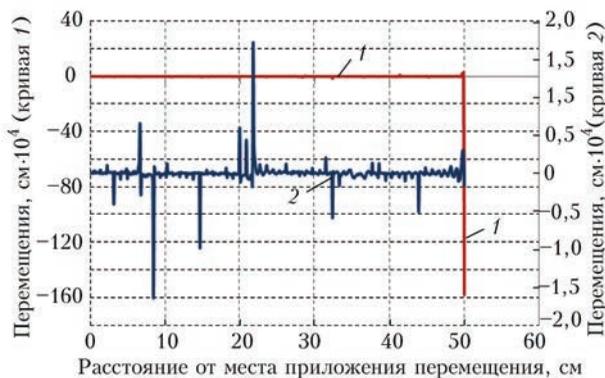


Рис. 4. Перемещения на свободном торце волновода с учетом датчика (1) и без учета датчика (2); 1 – $C_1(t) = 50$, $a = 52$; 2 – $C_1(t) = 50$, $a = 50$

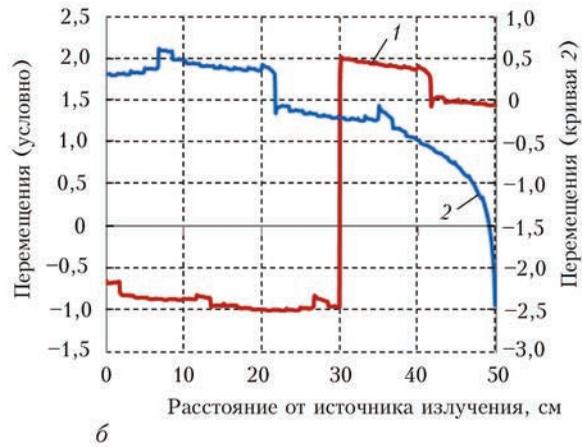
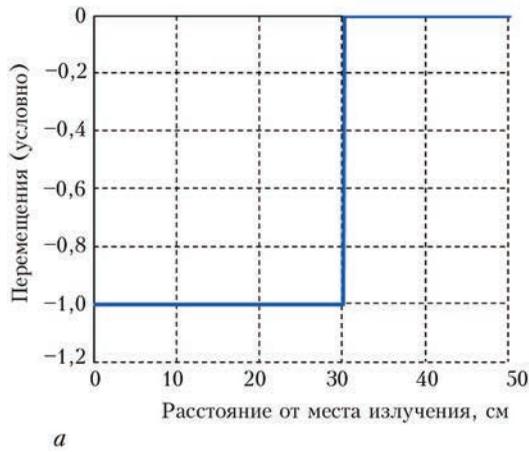


Рис. 5. Перемещения в волноводе бесконечной длины (а) и в волноводе длиной 50 см (б) при одинаковых параметрах излучения: $C_1t = 30$ (1) и 50 см (2)

Следует отметить некоторые особенности работы волноводов, получающих информацию в виде ударов по их рабочему торцу. В этом случае наблюдается сильное влияние свободной поверхности противоположного торца. Так, если рассмотреть движение волны в волноводе полубесконечных размеров, где перемещения вдоль него могут быть описаны выражением [1]:

$$u = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon_0 C_1}{\omega} \sin(\omega C_1 t) \cos(\omega z) d\omega = S(C_1 t - z) \varepsilon_0 C_1,$$

являющегося решением дифференциального уравнения (2) для стержня полубесконечных размеров, то движение волны описывается ступенчатой функцией и имеет вид, представленный на рис. 5, а. Перемещения в волноводе ограниченной длины (рис. 5, б) также выражаются ступенчатой функцией, но вид ее за счет переотражения волны от свободного торца волновода существенно отличается от рис. 5, а. В то же время пики волн в обоих случаях совпадают с координатой $z = C_1 t$. Расчеты перемещений в случае волновода ограниченной длины выполнены по программе, представленной на рис. 2 (формула (1)). На графике рис. 5, б также приведены перемещения в случае, когда импульс сигнала достиг свободного торца волновода ($C_1 t = 50$ см). Как видим, эта зависимость еще более отличается от приведенной на графике рис. 5, а.

Достаточно большое влияние на распределение перемещений в волноводе, вызванных волной АЭ, оказывает величина коэффициента вязкости материала волновода β . Как было уже сказано, эта величина характеризует сопротивление материала продвижению АЭ волны. На рис. 6 представлены графики распределения перемещений в волноводе при двух значениях коэффициента β , равных 0,1 и 0,4 с/см². Как видно из графиков, с увеличением сопротивления материала волновода продвижению АЭ волны происходит сглаживание распределения перемещений, а пик

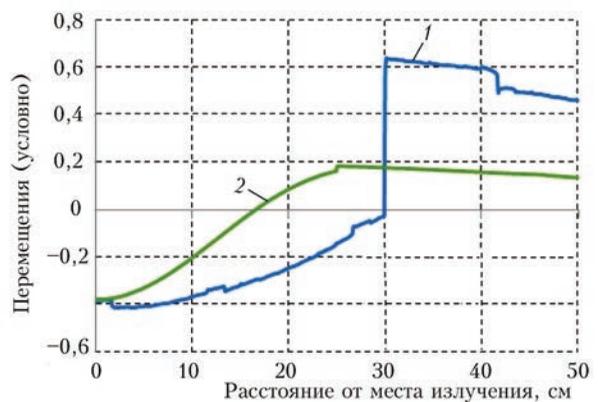


Рис. 6. Распределение перемещений в волноводе длиной 50 см в зависимости от величины коэффициента β (1 – 0,1; 2 – 0,4) и положения импульса излучения (1 – $C_1(t) = 30$; 2 – 25 см)

перемещений становится еле заметным на общем фоне (кривая 2 на рис. 6).

В заключение отметим, что необходим тщательный анализ дальнейшего использования АЭ информации, получаемой от контролируемого объекта с помощью волноводов, что связано в первую очередь с выбором волновода и способом его крепления на изделии.

Выводы

Получены аналитические выражения и разработаны оригинальные программы расчета перемещений в волноводах при различных способах их крепления.

Формы волн, распространяющихся в волноводе, существенным образом зависят от способа воздействия пластины на рабочий торец волновода – путем передачи перемещения торцу или ударным воздействием на него.

Передача сигнала АЭ датчику путем перемещения вызывает острый импульс,двигающийся по волноводу вплоть до его свободного торца, где в сильной мере ослабляется за счет отраженного импульса.

При передаче сигнала волноводу путем удара форма сигнала существенно отличается от сигнала

ла, образующегося передачей перемещения. Сигнал представляет собой ступенчатую функцию и не изменяется на свободном торце волновода.

В случае передачи информации перемещением значительную роль играет датчик АЭ, удлиняющий на величину своего размера по высоте длину волновода. При этом существенную роль очевидно играет рассеяние сигнала АЭ в сложном по форме корпусе датчика.

Полученные формулы позволяют учитывать материал, из которого изготовлен волновод.

Разработанные программы счета позволяют достаточно быстро и с заданной наперед точностью проводить расчет и сравнение различных вариантов волноводов и способов их крепления к конструкции.

Список литературы

1. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1966. – 228 с.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций; под ред. Б. Е. Патона. – К.: Индпром, 2008. – 815 с.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
4. Механіка руйнування та міцність матеріалів. Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика; під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1132 с.
5. Недосека А. Я., Недосека С. А. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 1 // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 2. – С. 3–8.
6. Недосека А. Я., Недосека С. А., Бойчук О. И. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2 // Там же. – 2013. – № 2. – С. 9–14.
7. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
8. Трантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.

References

1. Dvayt G. B. Tablitsy integralov i drugiye matematicheskiye formuly. – M.: Nauka, 1966. – 228 s. [in Russian].
2. Nedoseka A. Ya. Osnovy rascheta i diagnostiki svarnykh konstruktsiy; pod red. B. E. Patona. – K.: Indprom, 2008. – 815 s. [in Russian].
3. Timoshenko S. P. Kolebaniya v inzhenernom dele. – M.: Nauka, 1967. – 444 s. [in Russian].

4. Mekhanika ruynuvannya ta mitsnist materialiv. T. 5. Neruivnyi kontrol i tekhnichna diahnostryka; pid red. Z. T. Nazarchuka. – Lviv: Fyzyko-mekhanichnyi instytut im. H. V. Karpenka NAN Ukrainy, 2001. – 1132 s. [in Ukrainian].
5. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A. Vliyaniye lokalnogo skopleniya defektov na rasprostraneniye voln akusticheskoy emissii. Soobshcheniye 1 // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol. – 2013. – № 2. – S. 3–8. [in Russian].
6. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Boychuk O. I. Vliyaniye lokalnogo skopleniya defektov na rasprostraneniye voln akusticheskoy emissii. Soobshcheniye 2 // Tam zhe. – 2013. – № 2. – S. 9–14. [in Russian].
7. Dech G. Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasya i Z-preobrazovaniya. – M.: Nauka, 1971. – 288 s. [in Russian].
8. Tranter K. Dzh. Integralnye preobrazovaniya v matematicheskoy fizike. – M.: Gostekhizdat, 1956. – 204 s. [in Russian].

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОССКА, О. І. БОЙЧУК

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДІВ

Наведено результати досліджень хвиль, що проходять по хвилеводах. Показані два механізми передачі інформації хвилеводу від контрольованої конструкції та пов'язані з цим особливості сигналів АЕ, що поширюються по ньому. Бібліогр. 8, рис. 6.

Ключові слова: хвилевід, контрольована конструкція, сигнали акустичної емісії

A. Ya. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA, O. I. BOICHUK

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevych str., 03680, Kiev. E-mail: office@paton.kiev.ua

RESULTS OF WAVEGUIDE INVESTIGATIONS

Results of studying waves moving through waveguides are given. Two mechanisms of data transfer to waveguide from the controlled structure and the associated features of AE signals propagating through it, are shown. 8 References, 6 Figures.

Keywords: waveguide, monitored structure, acoustic emission signals

Поступила в редакцію 17.11.2016



**Восьмая международная конференция
ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И
ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

11 – 15 сентября 2017 г.
Украина, Одесса, отель «Курортный»

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- 3D-технологии
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Моделирование лучевых технологий
- Гибридные процессы
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2017

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОКРИТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК (ОБЗОР)

А. С. МИЛЕНИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведен анализ литературных данных о методах аналитического и численного прогнозирования зарождения и развития докритической поврежденности конструкционных материалов при циклическом нагружении. Выделены основные направления в построении соответствующих методик, приведены примеры как инженерных правил моделирования разрушения различного типа, так и фундаментальных многомерных моделей состояния материалов ответственных конструкций в характерных условиях эксплуатации. Библиогр. 70, рис. 2.

Ключевые слова: докритическое повреждение, циклические нагрузки, усталостное разрушение, прогнозирование

Прогнозирование работоспособности ответственных конструкционных элементов, деталей машин и механизмов, подверженных действию циклических нагрузок, с последующим подтверждением необходимого остаточного ресурса с учетом результатов дефектоскопии является неотъемлемым этапом экспертной оценки их фактического состояния. Это позволяет обосновать безопасность дальнейшей эксплуатации рассматриваемых элементов с приобретенной эксплуатационной дефектностью различной природы, исходя из требований к несущей способности и остаточному ресурсу, или определить объемы необходимых ремонтно-восстановительных работ. Докритическое разрушение (ДР) не вызывает существенного изменения несущей способности конструкций, но снижает сопротивляемость материала к образованию макродефектов, так как увеличение концентрации микронесплошности ведет к росту истинных напряжений и развитию пластических деформаций. И несмотря на высокую точность современных средств дефектоскопии обнаружение ДР, характеризующегося небольшим равномерно распределенным нарушением сплошности на наиболее нагруженных участках, является одной из сложностей инструментального анализа степени эксплуатационной поврежденности. Поэтому использование средств аналитического и численного прогнозирования ДР рационально не только с точки зрения экспертного анализа фактического состояния и работоспособности ответственных конструкций, но и как часть комплексных теорий зарождения и развития макроразрушения материалов.

Ввиду важности анализа степени накопления повреждения материалов при циклическом силовом воздействии вопросу разработки различных

методологических подходов по прогнозированию ДР материалов и конструкций посвящено достаточно много работ. В настоящей статье изложены и обобщены результаты обзора основных существующих методов такого анализа, в том числе применительно к характерным условиям эксплуатации ответственных конструкций.

Порядок оценки воздействия повторно-статических, вибрационных и усталостных нагрузок на элементы конструкции и детали механизмов (в том числе в присутствии макроскопических дефектов несплошности материала) зависит как от интенсивности силового воздействия, так и от характера физико-механических процессов, которые происходят при этом в металле [1–4] и др. Можно выделить следующие методологические подходы анализа усталостной докритической поврежденности конструкционных материалов [5, 6]:

- численное прогнозирование зарождения, накопления и развития микро- и макроповрежденности материала на основе континуальных подходов механики разрушения сплошных сред;
- процедуры, основанные на предположениях усталостного роста трещин;
- анализ кривых поврежденности.

Одним из распространенных подходов для прогнозирования накопления ДР металла ответственных конструкций, эксплуатирующихся в условиях нерегулярного циклического нагружения, является линейное правило суммирования равномерно распределенной поврежденности D , предложенное М. Майнером [7]:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \quad (1)$$

где n_i – количество циклов нагружения, которым соответствует усталостная долговечность N_i .

Этот подход является достаточно простым, но его применимость ограничена, прежде всего, для случаев переменной амплитуды нагружения [8], а также для структурно неоднородных материалов. Естественным развитием этого подхода являются нелинейные формулировки зависимостей степени ДР от количества циклов. В частности, в моделях Ф. Ричарта и Н. Ньюмарка [9], а также С. Марко и В. Старки [10] использовались показательные функции следующего вида:

$$D = \sum_i \left(n_i / N_i \right)^{q_i}, \quad (2)$$

где q_i – функция напряжений в рассматриваемой области.

В работе [11] Дж. Морроу предложил правило, которое базируется на анализе работы пластического взаимодействия и учитывает эффект последовательного нагружения. Накопление повреждения при этом имеет следующую зависимость от параметров процесса и состояния материала:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \left(\sigma_i / \sigma_{\max} \right)^{q_i}. \quad (3)$$

Здесь σ_{\max} – максимальная амплитуда напряжений за всю историю нагружения в рассматриваемом случае.

Основное отличие между выражениями (2) и (3) заключается в непосредственном учете особенностей напряженного состояния материала в процессе нагружения для соотношения Морроу, что упрощает проведение экспериментальных исследований по определению необходимых констант при анализе конкретной конструкции. Аналогичный подход, но основанный на континуальной теории разрушения, предложил Ж.-Л. Чабоши в работе [12], разработав следующую двухпараметрическую зависимость накопленной поврежденности за один цикл нагружения:

$$D = 1 - \left(1 - r \frac{1}{1 - \alpha_c} \right)^{\frac{1}{1 + \beta_c}}, \quad (4)$$

где α_c, β_c – константы материала; r – асимметрия цикла нагружения $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

Позднее этот подход был развит в работах Ж. Лемэтра [13], Т. Ванга [14], К. Ли [15], в рамках которых были получены аналогичные (4) аналитические зависимости, отличающиеся количеством констант материала и разными функциональными зависимостями поврежденности от напряженного состояния.

Следует отметить общую тенденцию в разработках методов численного прогнозирования

накопления докритической поврежденности, а именно, более широкое использование современных средств конечно-элементного моделирования состояния неоднородных конструкций в условиях сложного термосилового внешнего эксплуатационного воздействия для совместного решения задач термомодеформирования и континуальной механики разрушения [16–18]. Это позволяет с высокой точностью учитывать историю нагружения конструкционного элемента, в частности, не ограничиваться достаточно консервативными предположениями о регулярности размахов напряжений, как это предписывается актуальными нормативными документами, или существенной схематизацией кинетики, напряженного состояния материала.

Специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины была разработана методика численного прогнозирования развития ДР в сварных конструкциях в условиях повторно-статического, ультрамалоциклового и малоциклового нагружения [19]. Данный методологический подход базируется на конечно-элементном решении мультифизических задач развития напряженно-деформированного состояния и ДР материала сварных трубопроводных элементов по вязкому механизму с учетом неоднородности структурного состава металла в области монтажных сварных швов и наличия геометрических концентраторов напряжений типа локальных коррозийных потерь металла. Общность такого подхода позволяет не только учитывать влияние сварочного процесса и остаточного послесварочного состояния конструкции на зарождение и развитие ДР, но и применять современные теории механики разрушения, в частности, рассматривающие влияние деформаций сдвига на величину накопленной поврежденности [20].

Существенное силовое воздействие на конструкционный элемент при повышенных температурах (например, при ремонтной или монтажной сварке предварительно нагруженной конструкции, а также при термообработке и высокотемпературной эксплуатации) может иметь следствием развитие необратимых деформаций ползучести, которые влияют на зарождение и рост микроповрежденности материала [21, 22]. Как и деформации мгновенной пластичности, деформации ползучести характеризуются неизменностью объема деформируемого элемента конструкционного материала, поэтому достижение предела деформационной способности приводит к нарушению его сплошности. Основы моделирования эффекта ползучести были заложены в начале XX века Э. Андраде и Ф. Нортоном [23]. Принципы прогнозирования зарождения и развития равномерно распределенной докритической поврежденности при этом

были впервые предложены Л. Качановым [24] и Ю. Работновым [25], затем развиты Ж. Лемэтром [26], Я. Халтом [27], Ф. Лэки [28] и Д. Хэйхурстом [29]. Применение этих методик для случая усталостной ползучести было предложено Ж.-Д. Чабоши [30], что позволило реализовать инженерные подходы для проектирования конструктивных элементов, склонных к разрушению при развитии деформаций ползучести в условиях эксплуатации.

Так, одним из первых законов, описывающих развитие равномерно распределенной поврежденности материала D при развитой ползучести, было уравнение Качанова, которое связывает скорость накопления несплошности с главными напряжениями σ [24]:

$$\dot{D} = \left[\frac{\sigma}{A_D (1-D)} \right]^{r_D}, \quad (5)$$

где A_D, r_D – константы материала (точкой над переменной обозначена производная по времени).

Основными допущениями данного закона являются независимость напряженного состояния от величины накопленной поврежденности, отсутствие деформационного упрочнения материала, а также априори степенная зависимость скорости накопления повреждения от напряжений. Также предполагается, что материал подвержен силовому воздействию при изотермических условиях, так как одновременное воздействие повышенных температур и силового воздействия лишь в ограниченном числе практически важных случаев может рассматриваться без учета эффекта взаимодействия в рамках теорий термопластичности сплошной среды. Так, применительно к усталостному разрушению с учетом деформаций ползучести было предложено правило Тайра [31], предполагающее линейный закон взаимодействия напряженного состояния от одноосного циклического нагружения и от ползучести при некоторой выдержке на каждом цикле внешнего силового воздействия.

Важное фундаментальное предположение было предложено Ж. Лемэтром [32], который рассматривал поврежденность от ползучести и усталостного силового воздействия как функцию накопленных пластических деформаций ϵ_p вне зависимости от их природы. Это позволило сформулировать обобщенный закон следующего вида:

$$\dot{D} = \left[\frac{\sigma^2}{2ES(1-D)^2} \right]^s \cdot \left| \dot{\epsilon}_p \right|, \quad (6)$$

где s, S – параметры материала; E – модуль Юнга.

На основе этого закона в ряде работ было показано, что взаимодействие процессов ползуче-

сти и циклического деформирования с позиции зарождения и развития равномерной поврежденности материала существенно нелинейно в случае, если принимать во внимание кинематическое упрочнение материала, а также наличие порогового (критического) значения накопленных пластических деформаций, определяющих зарождение разрушения.

В случае сложного термосилового статического и усталостного воздействия на структурно неоднородную конструкцию ее разрушение может быть описано в рамках термодинамических законов необратимых процессов [33–35]. Построение такой методологии базируется на последовательном выполнении следующих этапов:

- выборе набора параметров состояния, фактическое значение которых определяет текущее состояние материала с учетом всех рассматриваемых физических процессов;
- определении поля потенциала, из которого выводятся законы состояния, такие как, например, термопластичность, для последующего вычисления параметров состояния;
- оценке пространственного распределения потенциала диссипации, для получения закономерностей развития параметров состояния, связанных с диссипативными механизмами.

Следует отметить, что предложенный алгоритм является достаточно общим и не предполагает определения конкретной системы параметров состояния, выбор которых должен базироваться исходя из особенностей исследуемых объектов и физических явлений. В частности, для рассматриваемого случая развития равномерно распределенной поврежденности конструкций в качестве потенциала состояния материала может быть выбрана удельная свободная энергия Гельмгольца. Как показали исследования [26], преимуществом такого описания является возможность представления различных компонент потенциала (термоупругой ψ_e , пластической ψ_p , температурной ψ_T) в аддитивной форме $\psi = \psi_e + \psi_p + \psi_T$. Это позволяет рассматривать вклад различных факторов внешнего влияния на рассматриваемый ответственный конструкционный элемент в рамках соответствующего математического описания частной компоненты потенциала.

Альтернативными подходами являются использование в качестве потенциала удельной свободной энthalпии Гиббса, которая вычисляется из свободной энергии Гельмгольца путем преобразования Лежандра, а также функционала диссипативного потенциала F_D , предложенного Н. Бонорой, и позволяющего решать комплексные задачи термосилового усталостного разрушения конструкционных материалов [36, 37]:

$$F_D = \left[\frac{1}{2} \left(-\frac{Y}{S_0} \right)^2 \frac{S_0}{1-D} \right] \frac{(D_{cr} - D)^{\alpha-1}}{p^{\frac{2+m}{m}}}, \quad (7)$$

где S_0 , α – константы материала; m – степень упрочнения; Y – скорость диссипации энергии при разрушении; D_{cr} – критическое разрушение, при котором формируются макродефекты.

В работе К. Чоу и И. Вэя [38] изложены принципы построения методологии, основанной на совместном решении обобщенных задач термопластичности и разрушения посредством расчета диссипативного потенциала. Это позволило учесть не только особенности трехмерного напряженно-деформированного состояния материала, подверженного циклическим нагрузкам, но и многоосность напряжений. К недостаткам данного подхода можно отнести прежде всего сложности в определении необходимых для расчета констант и эффективных свойств поврежденного материала (модуля Юнга и коэффициента Пуассона). Предложенный в работе экспериментальный метод, примененный авторами для алюминиевого сплава АА 2024-Т3, основан на результатах измерений в условиях одноосного растяжения лабораторных образцов, что нивелирует основные преимущества разработанных многомерных моделей и ограничивает общность получаемых результатов.

Кроме указанных выше подходов по математическому прогнозированию усталостного разрушения конструкций в рамках континуальных теорий можно выделить методы Галтье–Сегурэ [39], Деперауа [40], Пападопулоса [41], Экберга–Сотковски [42], Кано–Аля [43], Лиу–Махадевана [44], которые, прежде всего, ориентированы на различные экспериментальные способы получения характеристик сопротивления материала циклическим нагрузкам.

К одному из альтернативных путей прогнозирования зарождения и развития докритической поврежденности и работоспособности ответственных конструкций под действием усталостной нагрузки относится использование методов, основанных на теориях предельного состояния тел с трещинами, которые на сегодняшний день являются достаточно полными как с точки зрения фундаментального обоснования, так и с позиций инженерного внедрения. Здесь можно выделить два основных подхода, а именно:

- макроскопический анализ роста усталостной трещины;
- модели, рассматривающие развитие микротрещин в рамках микро- и мезомеханики разрушения.

Прогнозирование поведения макроскопической трещины (фактической или гипотетиче-

ской) не вызывает на сегодня существенных затруднений, так как, во-первых, базируется на возможностях современной дефектоскопии, что позволяет получать достаточно консервативные и обоснованные оценки, во-вторых, существующие методы прогнозирования роста усталостной трещины на основе приближения линейно-упругой сплошной среды подтвердили свою адекватность применительно к экспертизе работоспособности ответственных конструкций. Это позволяет рассматривать допустимость трещинообразных дефектов и обосновывать безопасность эксплуатации конструкций с докритической макротрещиной.

Так, расчеты в рамках механики разрушения проводятся на основе численных значений размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ΔK_I . В зависимости от величины ΔK_I можно выделить три характерных участка, определяемых величинами порогового ΔK_{th} и критического ΔK_{Ic} размаха интенсивности напряжений (рис. 1) [45, 46]. Если для участка I ($\Delta K_I < \Delta K_{th}$) скорость роста по усталостному механизму можно считать с практической точки зрения незначительной ($dc/dN < 0,5 \cdot 10^{-6}$ мм/цикл), то участок II ($\Delta K_{th} \leq \Delta K_I \leq \Delta K_{Ic}$) является ключевым при анализе склонности конструкций к усталостному разрушению. Участок III диаграммы скорости роста усталостной трещины характеризуется переходом к чисто хрупкому механизму разрушения материала и интенсивным (практически спонтанным) развитием трещинообразного дефекта.

Принято считать, что скорость роста усталостной трещины для случая $\Delta K_{th} \leq \Delta K_I \leq \Delta K_{Ic}$ описыва-

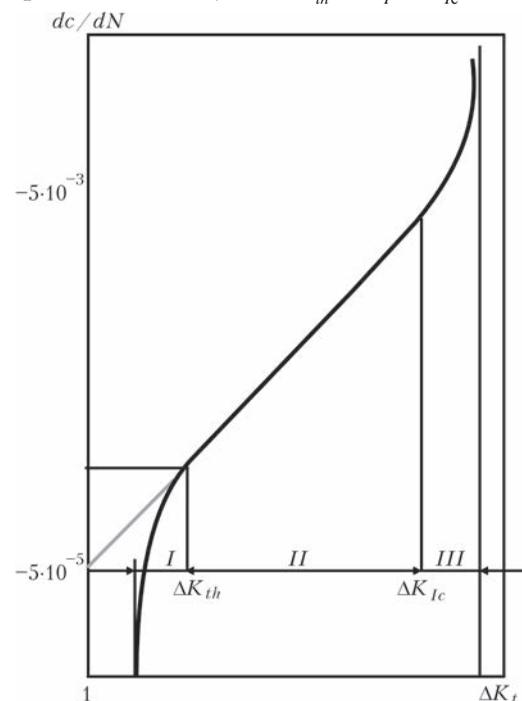


Рис. 1. Схема диаграммы роста усталостной трещины (в логарифмическом масштабе)

ется степенной зависимостью от величины размаха КИН [47]:

$$\frac{dc}{dN} = C_f (\Delta K_I)^{n_f}, \quad (8)$$

где C_f, n_f – константы материала; c – текущая длина трещины

На сегодня существует ряд методов прогнозирования усталостного роста трещин на участке II (в частности, модели Веллера [48] и Вилленборга [49]), использующих соотношения, аналогичные (8), которые отличаются порядком определения констант либо на основе соответствующих экспериментальных исследований, либо путем оценки степени развития зоны пластичности у вершины трещины. Кроме того, определенное распространение получили классические процедуры оценки усилия раскрытия трещины, предложенные Дж. Ньюманом [50], Г. Дилем [51], А. де Конингом [52]. Следует отметить, что рассмотрение состояния макроскопической трещины в металле конструкции является одним из максимально консервативных подходов оценки технического состояния конкретного конструкционного элемента в условиях эксплуатационных нагрузок. Этот подход получил широкое применение для оценки работоспособности сварных конструкций, так как позволяет учесть влияние остаточного напряженно-деформированного состояния в области сварного соединения на характер развития поврежденности.

Применительно к процессам зарождения и развития распределенной поврежденности трещинообразного типа на участке I (см. рис. 1), которая предопределяет появление макродефектов под действием циклических нагрузок, разработано ряд аналитических подходов с различной степенью консервативности. Так, авторами [53] предложен подход, аналогичный (8), предполагающий, что скорость роста микротрещин зависит от размаха пластических сдвиговых деформаций $\Delta \epsilon_s^p$:

$$\frac{dc}{dN} = C_\alpha (\Delta \epsilon_s^p)^{n_\alpha} c, \quad (9)$$

где C_α, n_α – константы материала.

При попытке обобщить описание процесса развития поврежденности на участках I и II диаграммы роста усталостных трещин возникают естественные сложности определения констант материала прежде всего для соотношения (9). Это связано с тем, что состояние металла в области вершины трещины неоднозначно коррелирует с величиной $\Delta \epsilon_s^p$, а также с тем, что константы C_α, n_α зависят не только от материала, но и от степени его текущей поврежденности.

Для решения указанной проблемы учета нелинейной зависимости скорости усталостного развития дефектности от ее текущего состояния принято использовать, в частности, теорию коротких

трещин [54–56] в предположении, что их зарождение имеет место на начальных этапах циклического нагружения конструкции, а степень докритической поврежденности определяется только процессами роста размеров микродефектов. Это позволяет снизить консерватизм оценки роста усталостной макротрещины, но требует более адекватного и физически обоснованного описания поведения материала с зародившимися микротрещинами. Существует несколько формальных пространственных критериев, позволяющих отнести трещинообразные дефекты к коротким трещинам (КТ), а именно [56]:

- микроструктурно короткие трещины (длина соизмерима с размером структурных элементов металла);
- механически короткие трещины (соразмерны с зонами развитой пластичности, вызванными локальными концентраторами напряжений конструкции или собственно самими дефектами);
- физически короткие трещины (длина которых не превышает 1 мм).

Наиболее обоснованным с точки зрения применимости механики сплошной среды и построения соответствующих численных методик можно назвать первый из перечисленных критериев, так как он связывает размеры несплошности с состоянием конкретного металла. Как показано в работе [57], развитие КТ не может быть описано в рамках линейной механики деформированной сплошной среды, как это принято для случая макротрещин, поскольку у вершины КТ формируется значительная область пластического деформирования и, кроме того, для них неприменимы стандартные формулы расчета КИН. В сравнении с диаграммой роста макротрещин, КТ имеют аномально высокие скорости роста при небольших значениях КИН (рис. 2), что должно быть учтено при построении соответствующих методик роста докритической поврежденности материала конструкции при циклическом нагружении.

Так, К. Миллер предложил прогнозировать кинетику роста КТ (т. е. трещинообразные дефекты с начальной длиной c_0 , которые увеличиваются в процессе усталостного нагружения вплоть до критической длины c_p) как двухэтапный процесс, зависящий от текущего размера трещины c , а именно рост микроструктурно КТ, когда ее длина не превышает некоторого переходного значения c_p , и рост физически КТ вплоть до критической длины c_f . Математически этот закон формулируется следующим образом [12]:

$$\frac{dc}{dN} = \begin{cases} A (\Delta \epsilon_s^p)^{n_\alpha} (d - c), & \text{если } c_0 \leq c \leq c_p, \\ B (\Delta \epsilon_s^p)^{n_\beta} c - C_\beta, & \text{если } c_t < c \leq c_f, \end{cases} \quad (10)$$

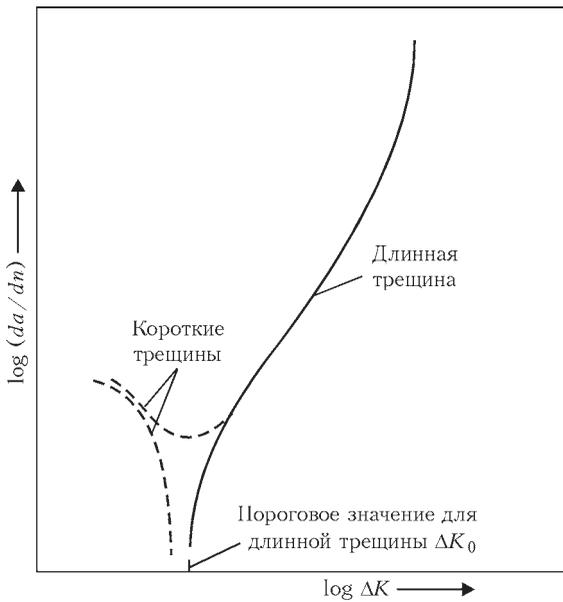


Рис. 2. Сравнение диаграмм роста макроскопической (сплошная линия) и короткой трещины (штриховая линия) под действием циклического нагружения [56]

где $A, B, n_\alpha, n_\beta, d$ – константы; $\Delta\epsilon_s$ – размах касательных напряжений; C_β – скорость роста дефекта в переходном состоянии.

Следует отметить, что в рамках этого метода не рассматривается процесс зарождения ДР, основываясь на типичном предположении, что появление докритической поврежденности имеет место уже на первых циклах нагружения. Кроме того, к основным его недостаткам можно отнести необходимость определения большого количества специфических констант, требующих проведения комплекса экспериментальных исследований с использованием соответствующих материалов и конструкционных элементов.

Аналогичный метод прогнозирования кинетики усталостного роста КТ, подтвердивший свою адекватность для оценки состояния ответственных конструкционных деталей из различных металлов и сплавов, был предложен А. МакЭвили [58]:

$$\frac{dc}{dN} = A_M M^2, \quad (11)$$

где

$$M = \left(\sqrt{2\pi r_e F} + Y \sqrt{\pi c F} \right) \Delta\sigma - (1 - e^{-k\lambda}) (K_{\text{оmax}} - K_{\text{мин}}) - \Delta K_{\text{effth}},$$

$A_M, k, r_e, \Delta K_{\text{effth}}$ – константы; $F = [\sec(0,5\pi\sigma_{\text{max}}/\sigma_T)]/2$; σ_{max} – максимальные напряжения цикла; σ_T – предел текучести материала; $Y = 0,73$ – коэффициент поправки КИН на размеры дефекта; $\Delta\sigma$ – размах напряжений; $K_{\text{мин}}$ – минимальное значение КИН в цикле; $K_{\text{оmax}}$ – максимальное значение КИН при выполнении условий раскрытия трещины.

В отличие от выражения (10), нелинейность усталостного роста КТ в соотношении (11) имеет степен-

ное выражение и не связана с изменением природы поврежденности, что облегчает использование этого метода для решения практических задач.

Применительно к конструкционным элементам и механизмам повышенной ответственности, а также для сварных или клепаных соединений, авторами [56] рекомендован консервативный метод оценки развития КТ в виде зависимости (8), но определение величины констант, фигурирующих в этом соотношении, должно обеспечивать необходимый коэффициент запаса прочности рассматриваемой конструкции. Кроме перечисленных методов можно выделить схожие по сути работы А. Васека и Я. Полака [59], С. Субраманьяна [60], М. Эндо [61] и др.

Использование кривых поврежденности для анализа степени ДР материала в результате воздействия внешнего циклического нагружения является продолжением соответствующих теоретических или экспериментальных разработок. В частности, к настоящему времени разработан ряд методик на основе линейных и билинейных правил накопления поврежденности в зависимости от условий нагружения. Одно- и многопараметрические линейные правила накопления микроразрушений являются достаточно простыми для инженерного использования, но не позволяют учесть различные этапы развития ДР материала. В свою очередь, с помощью билинейных кривых поврежденности рассматриваются этапы зарождения ДР, которые характеризуются небольшими скоростями роста поврежденности, и этап усталостного развития зародившихся микронесплошностей. В частности, С. Менсон предложил подход для рассмотрения двухэтапного процесса усталостного нагружения [62]:

$$D_1 = 0,354 \sqrt{\frac{n_1}{N_1}}, \quad D_2 = 0,654 \sqrt{\frac{n_2}{N_2}}, \quad (12)$$

где N_1, N_2 – усталостные долговечности на первом и втором этапах нагружения соответственно; n_1, n_2 – количество циклов на первом и втором этапах нагружения соответственно.

Дальнейшее развитие этого подхода позволяет количественно описать развитие ДР как на первом, так и на втором этапе циклического нагружения с помощью следующих соотношений [63]:

$$D_1 = \frac{n_1}{N_1}, \quad D_2 = \left(\frac{n_2}{N_2} \right)^{(N_1/N_2)^{0,4}}. \quad (13)$$

Для более сложного случая непропорционального нагружения авторами [64] предложены следующие уравнения:

$$D_1 = \frac{n_1}{N_1}, \quad D_2 = \left(\frac{n_2}{N_2} \right)^{[1/(1+\beta J)]} (N_1/N_2)^{0,4}. \quad (14)$$

где J – коэффициент непропорциональности между режимами нагружения на первом и втором этапах; β – константа материала, связанная с эффектом дополнительного упрочнения при циклическом деформировании материала.

Соотношения (12)–(14) основаны на обобщении имеющихся экспериментальных данных, что ограничивает их общность. Поэтому современной тенденцией является использование теорий зарождения и развития ДР и получение физически обоснованных кривых усталости. Так, на основе методов прогнозирования докритической поврежденности типа КТ авторы [57] получили следующие зависимости количества циклов до зарождения ДР (N_i) и до формирования макротрещин размером $c_f(N_p)$:

$$N_i = \frac{\ln\left(\frac{c_f}{c_f - c_0}\right)}{1,47510^{-41} (\Delta S)^{11,49}},$$

$$N_p = \frac{1}{0,587} \frac{c_{th}^{-0,587} - c_0^{-0,587}}{3 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\pi(\Delta S)^2}{E} \right]^{1,587}}. \quad (15)$$

Многообразие методов прогнозирования докритической поврежденности при циклическом нагружении связано со сложностью физико-механических процессов усталостного разрушения, поэтому формулировка соответствующих законов зарождения и развития ДР требует определенно-го упрощения постановки задачи для конкретной конструкции, материала или характера внешнего силового воздействия. Изменение принципов изначальной физической модели, принимаемой разработчиками за основу дальнейшего развития математического описания указанных процессов, позволяет решать определенный спектр практических и фундаментальных задач. Одним из путей дальнейшего развития научных основ аналитического прогнозирования усталостного ДР является объединение предположений существующих моделей для создания комплексных и гибридных теорий. Это позволило рассматривать задачи термоусталости [65], усталости при ползучести [66, 67], фреттинг усталости [68], учесть эффекты закрытия трещин в результате циклического усталостного нагружения [69, 70].

Выводы

Проведен критический обзор литературных данных о методологических подходах аналитического и численного прогнозирования зарождения и развития докритической поврежденности материала ответственных конструкций при циклическом нагружении. Показано, что основными на-

правлениями при построении соответствующих методик являются методы, основанные на принципах континуальной механики разрушения, анализе трещиностойкости материала и использовании кривых поврежденности.

На примере основных методик континуального развития равномерно распределенной поврежденности под действием циклического нагружения показаны широкие возможности анализа состояния конструкционных материалов, в том числе при совместном воздействии механических усилий и повышенных температур. Это позволяет снизить консервативность аналитических оценок технического состояния и работоспособности ответственных конструкций, в том числе за счет использования современных возможностей конечно-элементного компьютерного моделирования физических и технологических процессов.

Показано, что одним из перспективных направлений в разработке новых методов моделирования зарождения и развития усталостной докритической поврежденности конструкционных материалов является построение комплексных методик, использующих предположения моделей различных классов (континуальных, основанных на прогнозировании развития микро- и макротрещин) и расширяющих, таким образом, общность разрабатываемых подходов.

Список литературы

References

1. Troshchenko V.T. Metal strength at alternating loads. – Kiev: Nauk. Dumka, 1978. – 176 p. [in Russian].
2. Rabotnov Yu.N. Mechanics of deformed solid: manual for higher educational establishments. – M.: Nauka, 1988. – 712 p. [in Russian].
3. Jean Lemaitre Rodrigue Desmorat. Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 292 p.
4. Berezin I.Ya., Chernyavskii O.F. Resistance of materials. Fatigue fracture of metals and analysis of strength and fatigue life at alternating stresses. – Chelyabinsk: YuUrGU, 2003. – 76 p. [in Russian].
5. Hobbacher A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Intern. Inst. of Welding, doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. Paris: Intern. Inst. of Welding, 2008. – 149 p.
6. Mikhlayev P.G., Neshpor G.S., Kudriashov V.G. Kinetics of fracture. – M.: Metallurgia, 1979. – 279 p. [in Russian].
7. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue // J. Appl. Mech. – 1945. – № 67. – P. 159 – 164.
8. Borodii M. V. Life calculations for materials under irregular nonproportional loading // Strength of Materials. - 2007. – #5. – P. 560-565.
9. Richart F. E., Newmark N. M. A hypothesis for the determination of cumulative damage in fatigue // ASTM Proc. – 1948. – № 48. – P. 768–800.
10. Marco S. M., Starkey W. L. A concept of fatigue damage // Trans. ASME J. Eng. Mater. Tech. – 1954. – № 76. – P. 627 – 632.
11. Morrow J. D. The effect of selected sub-cycle sequences in fatigue loading histories // Random Fatigue Life Prediction. – ASME Publication, PVP 72. – 1986. – P. 43–60.
12. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for

- homogeneous materials // *Int. J. Fatigue*. – 1998. – Vol. 20, № 1. – P. 9–34.
13. Lemaître J., Chaboche J. L. Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement // *Journal Mécanique Appliquée*. – 1978. – № 2. – P. 317–365.
 14. Wang T., Lou Z. A continuum damage model for weld heat affected zone under low cycle fatigue loading // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1990. – № 37. – P. 825–829.
 15. Li C., Qian Z., Li G. The fatigue damage criterion and evolution equation containing material microparameters // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1989. – № 34 – P. 435–443.
 16. Jia L.-J., Kuwamura H. Ductile fracture model for structural steel under cyclic large strain loading // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2015. – № 106. – P. 110–121.
 17. Hommel J.-H., Meschke G. A hybrid modeling concept for ultra low cycle fatigue of metallic structures based on micropore damage and unit cell models // *Intern. J. of Fatigue*. – 2010. – № 32. – P. 1885–1894.
 18. Micromechanical modelling of cyclic plasticity incorporating damage / D. Steglich et al. // *Intern. J. of Solids and Structures*. – 2005. – № 42. – P. 337–351.
 19. Simulation of processes of initiation and propagation of subcritical damage of metal in welded pipeline elements at low-cycle loading / Velikoivanenko E. A. et al. // *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol.* - 2016. - #4. - P. 14-20 [in Russian].
 20. Xue L. Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2008. – № 75. – P. 3343–3366.
 21. Subramanian S. J., Sofronis P., Ponte Castaneda P. Void growth in power-law creeping solids: Effect of surface diffusion and surface energy // *Intern. J. of Solids and Structures*. – 2005. – Vol. 42, Is. 24–25. – P. 6202–6225.
 22. Micromechanical finite element calculations of temperature and void configuration effects on void growth and coalescence / M. F. Horstemeyer et al. // *Intern. J. of Plasticity*. – 2000. – Vol. 16, Is. 7–8. – P. 979–1015.
 23. Andrade E. N. The viscous flow in metals and allied phenomena // *Proceedings of Royal Society*. – 1910. – Series A. – Vol. 84. – P. 1.
 24. Качанов Л. М. Теория ползучести. – М.: Физматлит, 1960. – 455 с. (Kachanov L.M. Creep theory. – M.: Fizmatlit, 1960. – 455 p.)
 25. Rabotnov Yu.N. Creep of structural elements. – М.: Strojizdat, 1968. – 419 p.
 26. Mécanique des matériaux solides. 3ème édition // J. Lemaître et al. / Malakoff: DUNOD Editeur, 2005. – 596 p.
 27. Hult J. Capabilities limitations and promises. Mechanisms of Deformation and Fracture // *Continuum Damage Mechanics*. Oxford: Pergamon, 1979. – P. 233–247.
 28. Leckie F. A., Hayhurst D. R. Creep rupture of structures // *Proc. Royal Soc., London*. – 1974. – Vol. 340. – P. 323–347.
 29. Hayhurst D. R. Creep rupture under multi-axial state of stress // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1972. – Vol. 20, № 6. – P. 381–392.
 30. Chaboche J. L. Continuum Damage Mechanics. Parts I, II // *J. of Applied Mechs*. – 1988. – Vol. 55. – P. 59–72.
 31. Taira S. Lifetime of Structures Subjected to Varying Load and Temperature. Creep in Structures. Proceedings of Colloquium «Creep in structures». Ed. by Nicholas J. Hoff. Stanford, July 11–15, 1960. – Berlin: Springer Verlag, 1962. – P. 96–124.
 32. Lemaître J., Plumtree A. Application of damage concepts to predict creep-fatigue failures // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 1979. – 101. – P. 284–292.
 33. Polizzotto C. Thermodynamics and continuum fracture mechanics for nonlocal-elastic plastic materials // *European Journal of Mechanics* – 2002. – Vol. 21, Is. 1. – P. 85–103.
 34. Levitas V. I., Altukhova N. S. Thermodynamics and kinetics of nanovoid nucleation inside elastoplastic material // *Acta Materialia*. – 2011. – Vol. 5, Is. 18. – P. 7051–7059.
 35. Oller S., Salomon O., Onate E. A continuum mechanics model for mechanical fatigue analysis // *Computational Materials Science*. – 2005. – № 32. – P. 175–195.
 36. Bonora N., Milella P. P. Constitutive modeling for ductile metals behavior incorporating strain rate, temperature and damage mechanics // *Intern. J. of Impact Engineering*. – 2001. – № 26. – P. 53–64.
 37. Pironi A., Bonora N. Modeling ductile damage under fully reversed cycling // *Computational Materials Science*. – 2003. – № 26. – P. 129–141.
 38. Chow C. L., Wei Y. A model of continuum damage mechanics for fatigue failure // *Intern. J. of Fracture*. – 1991. – № 50. – P. 301–316.
 39. Galtier A., Seguret J. Critères multiaxiaux en fatigue exploitation en bureau d'étude. Proposition d'un nouveau critère // *Revue Française de Mécanique*. – 1990. – № 4. – P. 291–299.
 40. High cycle fatigue and a finite element analysis / P. Ballard et al. // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1995. – Vol. 18, Is. 3. – P. 397–411.
 41. A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals / I. V. Papadopoulos et al. // *Intern. J. of Fatigue*. – 1997. – Vol. 19, Is. 3. – P. 219–235.
 42. Ekberg A., Sotkovski P. Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels // *Intern. J. of Fatigue*. – 2001. – Vol. 23, Is. 1. – P. 29–43.
 43. Cano F., Constantinescu A., Maitournam H. Critère de fatigue polycyclique pour des matériaux anisotropes: application aux monocristaux // *C. R. Mécanique*. – 2004. – Vol. 332. – P. 115 – 121.
 44. Liu Y., Mahadevan S. Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals // *Intern. J. of Fatigue*. – 2005. – Vol. 27, Is. 7. – P. 790–800.
 45. Troshchenko V. T., Pokrovsky V. V., Prokopenko A.V. Crack resistance of materials under cyclic loading. - Kiev: Nauk. Dumka, 1978. - 256 p. [in Russian].
 46. Ritchie R. O. Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids // *Intern. J. of Fracture*. – 1999. – № 100. – P. 55–83.
 47. Amsterdam E., Grooteman F. The influence of stress state on the exponent in the power law equation of fatigue crack growth // *Intern. J. of Fatigue*. – 2016. – Vol. 82. – Part 3. – P. 572–578.
 48. Practical fatigue analysis of hydraulic cylinders and some design recommendations / I. Marczevska et al. // *Intern. J. of Fatigue*. – 2006. – № 28. – P. 1739–1751.
 49. Comparative study between crack closure model and Willenborg model for fatigue prediction under overload effects / S. Jiang et al. // *Chinese J. of Aeronautics*. – 2016. – Vol. 29, Is. 6. – P. 1618–1625.
 50. Newman J. C. Prediction of fatigue crack growth under variable amplitude and spectrum loading using a closure model // *ASTM Special technical publication*. – 1982. – Vol. 761. – P. 255–277.
 51. Dill H. D., Saff C. R., Potter J. M. Effect of Flight Attack Spectrum on Crack Growth // *ASTM Special technical publication*. – 1980. – Vol. 714. – P. 205–217.
 52. Koning A. U. A simple crack closure model for prediction of fatigue crack growth rates under variable amplitude loading // *ASTM Special technical publication*. – 1981. – Vol. 743. – P. 63–85.
 53. Ibrahim M. F. E., Miller K. J. Determination of fatigue crack initiation life // *Fatigue of Engineering Materials and Structures*. – 1980. – № 2. – P. 351–360.
 54. Miller K. J., Ibrahim M. F. E. Damage accumulation during initiation and short crack growth regimes // *Fatigue of Engineering Materials and Structures*. – 1981. – № 4 – P. 263–277.
 55. Barsom M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in various bridge steels // *ASTM Special technical publication*. – 1976. – 595. – P. 217–235.
 56. Suresh S., Ritchie R. O. Propagation of short fatigue cracks // *International Metals Reviews*. – 1984. – Vol. 29, № 6. – P. 445–475.
 57. Chattopadhyay S. Design fatigue curves based on small crack growth and crack closure // *Journal of Applied Science & Engineering Technology*. – 2008. – № 2. – P. 9–15.
 58. Endo M., McEvily A. J. Prediction of the behavior of small fatigue cracks // *Materials Science and Engineering*. – 2007. – Vol. 468. – P. 51–58.
 59. Vasek A., Polak J. Low cycle fatigue damage accumulation in Armco-iron // *Fatigue of Engineering Materials and Structures*. – 1991. – 14(2–3). – P. 193–204.
 60. Subramanian S. A cumulative damage rule based on the knee point of the S–N curve // *ASME J. of Engineering Materials and Technology*. – 1976. – № 98. – P. 316–321.

61. Endo M., McEvily A. J. Fatigue crack growth from small defects under out-of-phase combined loading // Engineering Fracture Mechanics. – Vol. 78, Is. 8. – P. 1529–1541.
62. Manson S. S., Frech J. C., Ensing S. R. Application of a double linear damage rule to cumulative fatigue // ASTM STP 415. – 1967. – P. 384–412.
63. Manson S. S., Halford G. R. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage // Intern. J. Fracture. – 1981. – Vol. 18. – P. 169–192.
64. Chen X., Jin D., Kim D. S. Fatigue life prediction of type 304 stainless steel under sequential biaxial loading // Intern. J. Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – P. 289–299.
65. Bourbita F., Rémy L. A combined critical distance and energy density model to predict high temperature fatigue life in notched single crystal superalloy members // Intern. J. of Fatigue. – 2016. – Vol. 84. – P. 17–27.
66. Analysis of type 316 stainless steel behavior under fatigue, creep and combined fatigue-creep loading / R. Gomuc et al // ASME J. of Pressure Vessel Technology. –1990. – № 112. – P. 240–250.
67. Creep fatigue models of solder joints: A critical review / E. H. Wong et al. // Microelectronics Reliability. – 2016. – Vol. 59. –P. 1–12.
68. Fretting-contact-induced crack opening/closure behaviour in fretting fatigue / N. Noraphaipaksa et al. // Intern. J. of Fatigue. – 2016. – Vol. 88. – P. 185–196.
69. Proposal of a fatigue crack propagation model taking into account crack closure effects using a modified CCS crack growth model / S. Blasón et al. // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 1. – P. 110–117.
70. Sarzosa D. F. B., Godefroid L. B., Ruggieri C. Fatigue crack growth assessments in welded components including crack closure effects: Experiments and 3-D numerical modeling // Intern. J. of Fatigue. – 2013. – Vol. 47. – P. 279–291.

О. С. МІЛЕНІН

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОКРИТИЧНОГО
РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
ПІД ДІЄЮ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ (ОГЛЯД)

Проведено аналіз літературних даних стосовно методів аналітичного та чисельного прогнозування зародження і розвитку докритичної пошкодженості конструкційних матеріалів при циклічному навантаженні. Виокремлено основні напрямки в побудові відповідних методик, наведено приклади як інженерних правил моделювання різних типів руйнування, так і фундаментальних багатовимірних моделей стану матеріалу відповідальних конструкцій за характерних умов експлуатації. Бібліогр. 70, рис. 2.

Ключові слова: докритичне пошкодження, циклічні навантаження, втомне руйнування, прогнозування

A. S. MILENIN

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11 Kazimir Malevych str., 03680, Kiev.
E-mail: office@paton.kiev.ua

METHODS OF PREDICTION OF SUBCRITICAL
FRACTURE OF STRUCTURAL MATERIALS UNDER
THE IMPACT OF CYCLIC LOADS (REVIEW)

Published data on the methods of analytical and numerical prediction of initiation and propagation of subcritical damage in structural materials at cyclic loading, are analyzed. Main directions of elaboration of the respective procedures were outlined, and examples of both engineering rules of modeling different types of fractures, and of fundamental multidimensional models of the state of materials in critical structures under characteristic service conditions are given. 70 References, 2 Figure.

Keywords: subcritical damage, cyclic loads, fatigue fracture, prediction

Поступила в редакцію
27.01.2017

НОВАЯ КНИГА

«Титан. Технологии. Оборудование. Производство» – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. – 254 с. Выпуск четвертый.

Сборник включает более сорока статей, опубликованных в основном в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2014–2016 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов, оборудования и материалов при производстве и сварке титана и его сплавов. Представлены обзоры по аддитивному производству и сварке трением металлических материалов. Приведены направления деятельности НТЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по промышленному производству слитков титановых сплавов и созданию новых сплавов на основе титана.

Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

Предыдущие три выпуска сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство», включающие статьи из журналов «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за периоды 2001–2004, 2005–2010, 2011–2013 гг. находятся в открытом доступе на сайте Издательского Дома «Патон»: www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations.

Заказы на сборник просьба направлять
в редакцию журнала.



Х-RAY MINI ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПЛОСКОПАНЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В. А. ТРОИЦКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ², Р. О. ПАСТОВЕНСКИЙ¹

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». 03056, Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Предложена новая технология радиационного контроля с применением малогабаритных твердотельных плоскочелпанельных детекторов, которая получила название X-ray mini технология. Приведены результаты радиационного контроля с помощью предложенной технологии сварных соединений различных изделий и состояния сотовых панелей летательных аппаратов. Библиогр. 2, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: радиационный контроль, X-ray mini технология, твердотельный плоскочелпанельный детектор, рентгенотелевизионная система, цифровая радиография

Для повышения качества сложных изделий, машин и агрегатов на всех стадиях разработки, изготовления и эксплуатации необходим неразрушающий контроль (НК) исходных материалов, технологии изготовления и свойств готовой продукции. Среди видов НК значительное место занимает радиационный контроль. Радиационные методы НК применимы к изделиям из любых материалов и превосходят полнотой информации о дефектах (тип, форма, размеры, место расположения) другие виды НК.

Радиационный контроль качества использованных металлов позволяет обнаруживать поры, трещины, инородные включения, несплошности и другие дефекты. Контроль при изготовлении обеспечивает требуемое качество технологии изготовления и сборки продукции. При эксплуатации сложной техники необходимо контролировать отклонения от нормы, возникающие в процессе ее работы (повышенные зазоры, усталостные трещины, инородные накопления в замкнутых объемах, коррозию металла и т. д.). В ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ имеется опыт разработки и внедрения современных систем для рентгенотелевизионного контроля, которые могут применяться в различных отраслях промышленности [1].

В современных рентгенотелевизионных системах возможно применение недорогих малогабаритных твердотельных плоскочелпанельных детекторов. Новая технология на основе таких малогабаритных детекторов получила название X-ray mini. В отличие от традиционной пленочной радиографии или компьютерной радиографии, где в качестве детекторов применяют дорогие пленки или запоминающие пластины, X-ray mini технология позволяет значительно снизить стоимость и повысить оперативность контроля, а также обеспечивает практически мгновенный его результат.

Важной особенностью X-ray mini технологии является миниатюрность рентгеновского детектора, что позволяет проводить оперативный рентгеновский контроль труднодоступных узлов эксплуатируемых самолетов, турбин, реакторов и т. п. Такую технологию в настоящее время применяют для рентгенодиагностики в стоматологии. Малогабаритный рентгеновский детектор располагается в ротовой полости пациента и позволяет за доли секунды получить детальное рентгеновское изображение зубов и десен пациента. Нами эта технология освоена для задач промышленности.

На рис. 1 показан детектор для технологии X-ray mini типа S10811-11 с размером рабочего поля 34×24 мм, толщиной 6 мм, размером пикселя 20 мкм и количеством пикселей 1700×1200. Детектор обеспечивает высокие чувствительность контроля и разрешающую способность (20 пар лин./мм). В ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ такая X-ray mini технология используется для контроля сварных соединений различных изделий, состояния сотовых панелей летательных аппаратов, структуры композитов, исследования замкнутых



Рис. 1. Твердотельный плоскочелпанельный детектор S10811-11 с размером рабочего поля 34×24 мм и площадью 8,16 см² на 70 кВ

пространств (рис. 2–9), где невозможно разместить традиционные пленки или запоминающие пластины.

При реализации технологии X-ray mini используется детектор рентгеновского изображения, площадь которого более чем на два порядка меньше площади традиционных кассет с пленкой, запоминающих пластин или плоскопанельных детекторов стандартных размеров. Благодаря небольшим размерам твердотельный детектор может быть размещен в любом труднодоступном или стесненном пространстве, а также перемещаться по поверхности контролируемого объекта. Такое сканирование позволяет исследовать обнаруженные дефекты и неоднородности контролируемого объекта в разных ракурсах. В реальном времени информация о внутренней структуре исследуемого участка контролируемого объекта поступает на экран монитора. Основное отличие данной технологии X-ray mini от известной цифровой радиографии на основе плоскопанельных детекторов состоит в том, что стоимость такого миниатюрного детектора в десятки раз меньше стоимости плоскопанельного детектора стандартных размеров [2].

В таблице приведены результаты и режимы контроля сварных соединений стальных и алюминиевых пластин толщиной 1,5 и 2 мм с использованием технологии X-ray mini (детектор S10811-11, рис. 1). Для просвечивания образцов использовался рентгеновский аппарат (РА) РАП 150/300, а также микрофокусный аппарат РЕИС-100И.

На рис. 2 показан процесс контроля сварного соединения стальных пластин толщиной 1,5 мм микрофокусным аппаратом РЕИС-100И. Плоскопанельный детектор S10811-11 закреплен на штативе за контролируемым образцом.

При просвечивании образцов аппаратом РАП 150/300 его рентгеновская трубка работала в режиме малого фокуса и фокусное расстояние устанавливалось равным 600...700 мм. При работе с аппаратом РЕИС-100И, учитывая его малую мощность и малый размер фокусного пятна, фокусное расстояние устанавливалось равным 100 мм. Во всех режимах просвечивания анодное напряжение рентгеновских трубок не превышало 70 кВ. При контроле стальных образцов использовался про-

волочный эталон 11 (ГОСТ 7512–82), а при контроле алюминиевых образцов – проволочный эталон 22 (ГОСТ 7512–82).

На рис. 3 приведены изображения, полученные при просвечивании сварного соединения стальных пластин толщиной 1,5 мм в режиме 2 (см. таблицу). Изображение контролируемого образца представлено в негативе и позитиве. Маркировочный знак расположен на седьмой проволочке эталона. Как видно из рисунка, чувствительность по проволочному эталону составляет 0,063 мм. Таким образом, технология X-ray mini на основе твердотельных миниатюрных детекторов S10811-11 обеспечивает чувствительность, которая не уступает используемой в настоящее время радиографии с промежуточными носителями информации (пленки, запоминающие пластины).

На рис. 4–6 проиллюстрированы возможности X-ray mini технологии на примере контроля сотовой конструкции закрылка крыла самолета, показанной на рис. 4.

Вначале проводится панорамное просвечивание сотовой конструкции. На рис. 5 приведено цифровое изображение сотовой конструкции, полученное с помощью рентгенотелевизионной системы РТВ-03 с размером рабочего поля 160×120 мм на основе рентгеновского экрана $Gd_2O_2S(Tb)$ и высокочувствительной ПЗС-камеры. Далее проводится локализация дефектных участков, которые предполагается детально исследо-



Рис. 2. Контроль сварного соединения стальных пластин толщиной 1,5 мм микрофокусным аппаратом РЕИС-100И и плоскопанельным детектором S10811-11

Режимы контроля

Режим	Материал	Толщина, мм	Тип РА	U_a , кВ	I_a , мА	Фокусное расстояние, мм	Время экспозиции, с	Чувствительность по проволочному эталону, мм
1	Сталь	1,5	РАП 150/300	60	4	600	20	0,063
2	Сталь	1,5	РЕИС-100И	65	0,04	100	20	0,063
3	Алюминий	2	РАП 150/300	50	3,7	700	10	0,1

Примечание: U_a и I_a – анодное напряжение и анодный ток рентгеновских трубок соответственно

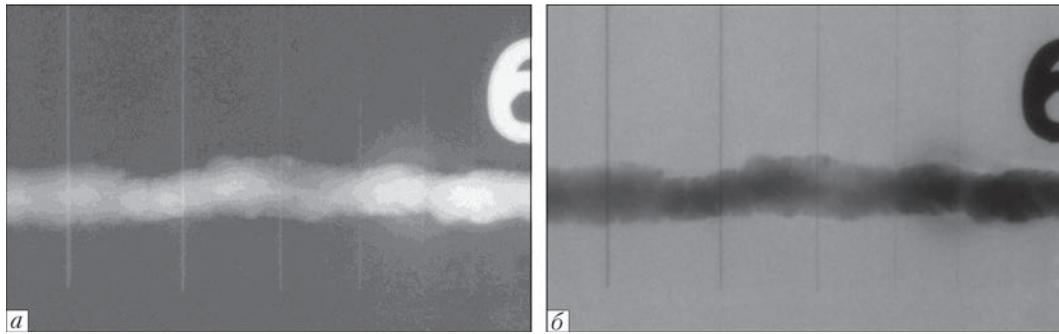


Рис. 3. Цифровые изображения сварного соединения, соответствующие режиму 2 таблицы: а – негатив; б – позитив

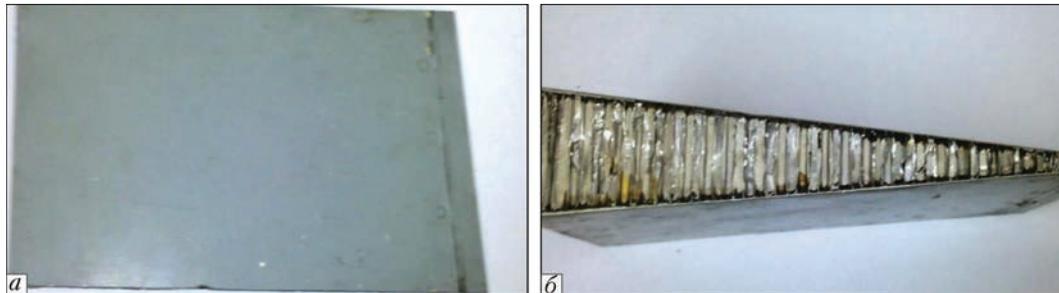


Рис. 4. Сотовая конструкция закрылка крыла самолета: а – вид сверху; б – вид сбоку



Рис. 5. Цифровое изображение фрагмента сотовой конструкции закрылка крыла самолета с локализацией дефектного участка для исследования с помощью детектора S10811-1

вать с высокой пространственной разрешающей способностью с помощью твердотельного плоскопанельного детектора S10811-11. На рис. 5 дефектный участок, размеры которого выбираются равными размерам детектора S10811-11, показан белым прямоугольником.

Далее проводится просвечивание выделенного дефектного участка сотовой конструкции с применением плоскопанельного детектора S10811-11. Полученные в результате такого просвечивания цифровые изображения дефектного участка приведены на рис. 6. Семикратное увеличение выделенного дефектного участка позволяет детально исследовать и расшифровать дефект сотовой конструкции.

На рис. 7–9 приведены результаты контроля с помощью технологии X-ray mini трехслойного образца из нержавеющей стали с двойной точечной сваркой (рис. 7).

Вначале, как и при контроле сотовой конструкции (см. рис. 4), проводится панорамное просвечивание образца с помощью рентгентелевизионной системы РТВ-03 с размером рабочего поля 160×120 мм. Полученные цифровые изображения образца с точечной сваркой представлены на рис. 8. Далее проводится выделение проблемных (дефектных) участков, которые предполагается детально исследовать с помощью твердотельно-

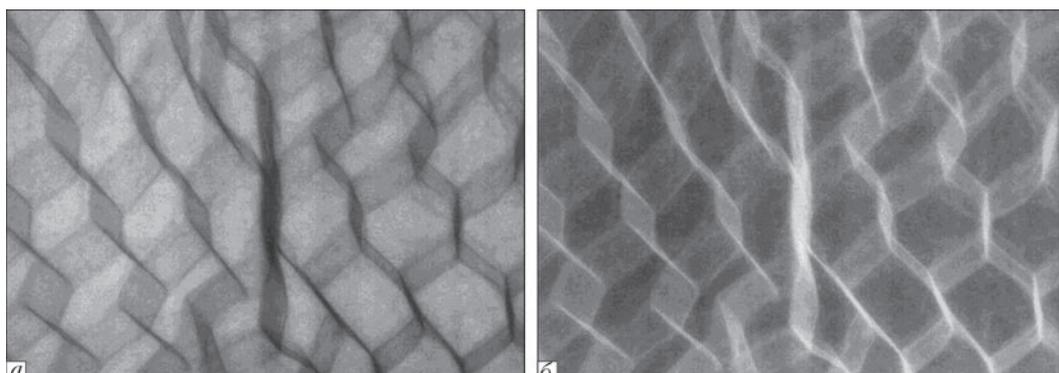


Рис. 6. Цифровые изображения дефектного участка сотовой конструкции закрылка крыла самолета, полученные с применением твердотельного преобразователя типа S10811-11: а – позитив; б – негатив

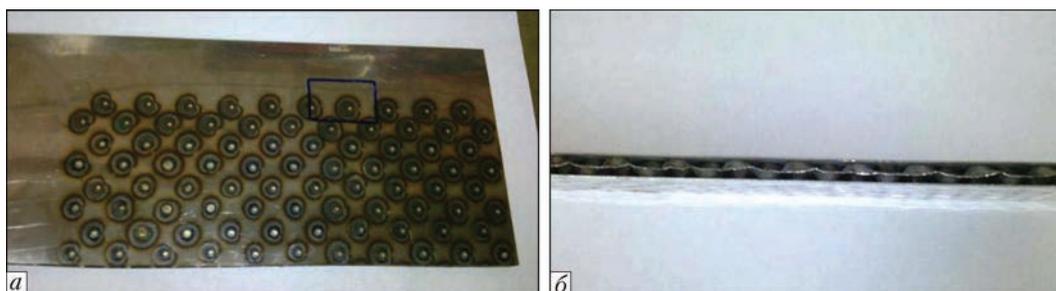


Рис. 7. Изображение трехслойного образца с двойной точечной сваркой: *а* – вид сверху; *б* – вид с торца

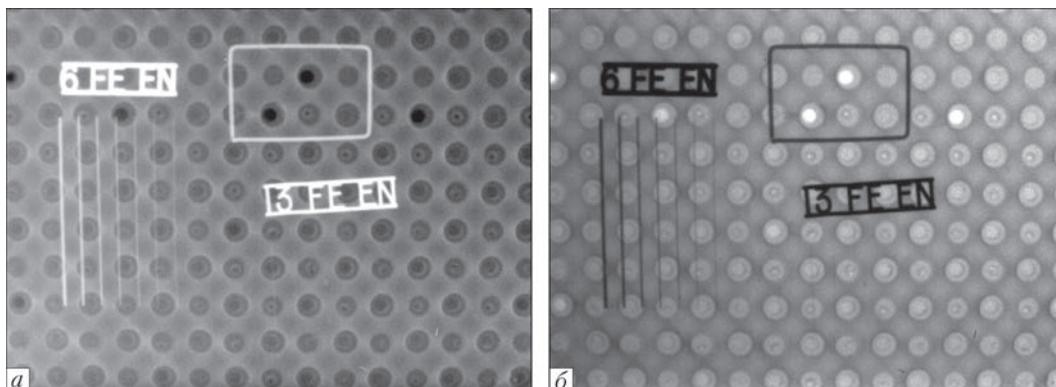


Рис. 8. Цифровые изображения образца с двойной точечной сваркой с локализацией участка для исследования с помощью твердотельного преобразователя S10811-11: *а* – негатив; *б* – позитив

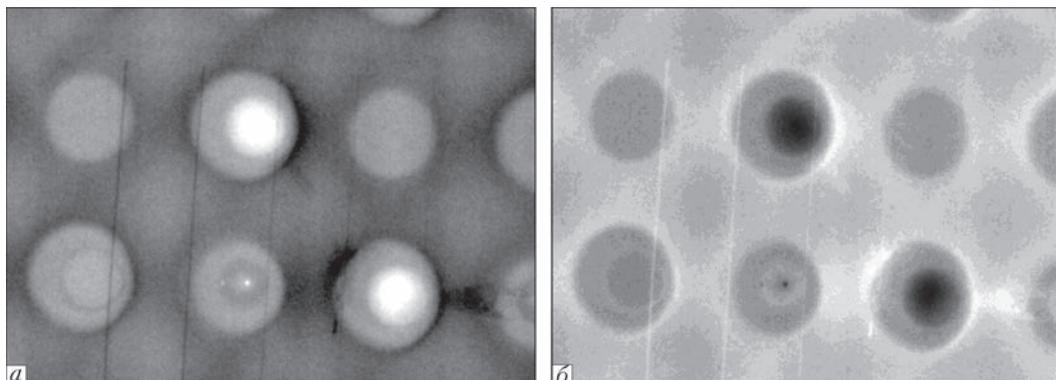


Рис. 9. Цифровые изображения дефектного участка образца с двойной точечной сваркой, полученные с применением твердотельного преобразователя типа S10811-11: *а* – позитив; *б* – негатив

го плоскопанельного детектора S10811-11. На рисунке выделенный дефектный участок обведен белым прямоугольником на негативном изображении и черным прямоугольником на позитивном изображении.

После выделения дефектных участков проводится их просвечивание с применением плоскопанельного детектора S10811-11. На рис. 9 приведены полученные в результате такого просвечивания цифровые изображения дефектного участка образца с двойной точечной сваркой (см. рис. 8). Как на негативном, так и на позитивном изображениях четко видны дефекты, характерные для этого вида сварки. Такие детальные изображения могут быть получены только на основе технологии X-ray mini. Эти дефекты практически не выявляются на изображениях (см. рис. 8), полученных с помощью рентгенотелевизионной системы РТВ-03.

Выводы

Миниатюрные твердотельные плоскопанельные детекторы открывают новые технологические возможности для радиационного НК ответственных изделий, узлов и агрегатов.

X-ray mini технология реализуется на серийном недорогом оборудовании и позволяет более чем на порядок снизить стоимость контроля по сравнению с компьютерной и цифровой радиографией на основе плоскопанельных детекторов стандартных размеров.

Сканирование контролируемых объектов миниатюрными детекторами и сшивание изображений отдельных экспозиций с помощью специального программного обеспечения позволяет контролировать протяженные объекты в разных ракурсах. Для выполнения сканирования конкретных объектов миниатюрными детекторами должно быть разработано вспомогательное оборудование.

Список литературы

1. Современные системы радиационного неразрушающего контроля / В. А. Троицкий и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 1. – С. 23–35.
2. Троицкий В. А., Михайлов С. Р., Бухенский В. Н. Флеш-радиография объектов АЭС на основе плоскочелюстных детекторов // Информационный бюллетень Украинского товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики «НК-Інформ» – 2014. – № 3. – С. 6–14.

References

1. Modern systems of radiation non-destructive testing / Troitskii V. A. et al. // Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol. - 2015. – #1. – P. 23–35. [in Russian].
2. Troitsky V. A., Mikhaylov S. R., Bukhensky V. N. Flash-radiografiya obyektov AES na osnove ploskopanelnykh detektorov // Informatsiyni biuleten Ukrainskoho tovarystva neruivnogo kontroliu ta tekhnichnoi diahnostryky «NK-Inform» – 2014. – № 3. – С. 6–14.

В. О. ТРОЙЦЬКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ²,
Р. О. ПАСТОВЕНСЬКИЙ¹

¹ІЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²НТУУ «Київський політехнічний ін-т ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ-56, пр-т Перемоги, 37. E-mail: fel@kpi.ua

X-RAY MINI ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ ТВЕРДОТІЛЬНИХ ПЛОСКОПАНЕЛЬНИХ ДЕТЕКТОРІВ

Запропоновано нову технологію радіаційного контролю із застосуванням малагабаритних твердотільних плоскочелюстных

детекторів, яка отримала назву X-ray mini технологія. Наведено результати радіаційного контролю за допомогою запропонованої технології зварних з'єднань різних виробів, стану стільникових панелей літальних апаратів та ін. Бібліогр. 2, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: радіаційний контроль, X-ray mini технологія, твердотільний плоскочелюстний детектор, рентгенотелевізійна система, цифрова радіографія

V. A. TROITSKY¹, S. R. MIKHAILOV²,
R. O. PASTOVENSKY¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU.
11, Kazimir Malevich str., 03680, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²NTUU «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute».
37, Pobedy Ave., 03056, Kiev, Ukraine. E-mail: fel@kpi.ua

X-RAY MINI TESTING TECHNOLOGY BASED ON SOLID PLANE PARALLEL DETECTORS

A new technology of radiation control with application of small-sized solid plane parallel detectors is proposed, which was called X-ray mini technology. The paper gives the results of the proposed technology application for radiation testing of welded joints of different items, state of honeycomb panels of flying vehicles and investigation of closed spaces. 2 References, 1 Tables, 9 Figures.

Keywords: radiation control, X-ray mini technology, solid plane parallel detector, X-ray TV system, digital radiography

Поступила в редакцію
18.01.2017

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ
Международная Ассоциация «Сварка»



Международная конференция
**РОБОТИЗАЦІЯ І АВТОМАТИЗАЦІЯ
СВАРОЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Київ, ІЗС ім. Е.О. Патона НАН України
12–14 июня 2017

Председатели программного комитета
академики Л. М. Лобанов и И. В. Кривцун

Тематика конференції:

- основные тенденции развития автоматизации и робототехники в сварочном производстве;
- датчики и преобразователи для контроля и регулирования процессов сварки;
- средства обучения и программирования роботов;
- техническое зрение роботов;
- технологии и оборудование для автоматизированной и роботизированной сварки;
- аддитивные технологии;
- адаптивные роботы и механизированные комплексы;
- охрана труда;
- применение интернет-технологий;
- использование методов искусственного интеллекта

Адрес оргкомитета:
ІЗС ім. Е.О. Патона НАН України
ул. Казимира Малевича (Боженко), 11, г. Київ, 03680, Україна
тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/rus/robotweld_2017

Подача заявок для участия и отправка докладов до 15.04.2017

Одобренные программным комитетом конференции доклады будут изданы в специальном выпуске журнала «Автоматическая сварка» №6, 2017.

ИНДЕНТИРОВАНИЕ ОТ МАКРО- ДО НАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ И ПРИМЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ С ОСОБОЙ СТРУКТУРОЙ

Ю. А. ХОХЛОВА, Д. А. ИЩЕНКО, М. А. ХОХЛОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Инденитрование является наиболее точным, теоретически и экспериментально подтвержденным стандартизированным методом определения физико-механических свойств микро- и нанометрового уровня для материалов с тонкой структурой, локальным градиентом свойств, материалов в состоянии интенсивной пластической деформации или после термического воздействия, а также сверхтвердых, хрупких и эластичных материалов, механические свойства которых невозможно определить иными способами. Методология определения прецизионными средствами разрабатывается в рамках перспективного научного направления, которое можно назвать механикой нанотестирования. Библиогр. 8, рис. 9.

Ключевые слова: физико-механические свойства, наноинденитрование, микроинденитрование, твердость, модуль упругости Юнга, упрочнение

Перспективным направлением развития методологии изучения ресурсных возможностей и служебных характеристик конструкционных материалов является локализация исследуемых объемов материала до масштабов микро- и нанометрового уровня. Получаемые при этом физико-механические свойства существенно отличаются от свойств, проявляющихся в макроскопических масштабах. Обычные методы, которые используются для определения свойств материалов в макрообъемах, непригодны для изучения и диагностирования объектов структуры порядка 1 мкм и менее. Методология определения механических свойств прецизионными средствами разрабатывается в рамках перспективного научного направле-

ния, которое можно назвать механикой нанотестирования [1].

Инденитрование – это тест, основанный на методе Оливера и Фарра [2] для определения твердости и модуля упругости по диаграммам инденитрования, которые фиксируются при непрерывном внедрении алмазного трехгранного пирамидального индентора Берковича [3] в соответствии с ISO/FDIS 14577-1:2015; Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – Part 1: Test method (ISO Central Secretariat, Geneva, Switzerland) (рис. 1).

Описание методики и оборудования. В тестировании применяется прибор «Микро-гамма» (рис. 2), разработанный в лаборатории нанотехно-

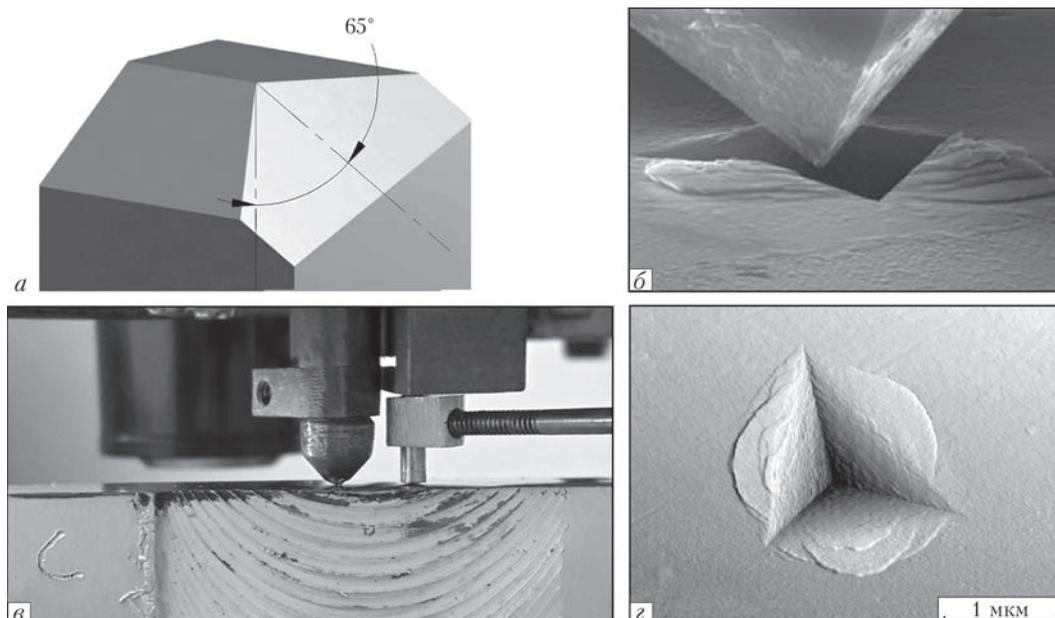


Рис. 1. Индентор Берковича (а), установка индентора на поверхность образца для теста (б, в) и отпечаток индентора в материале (г)

© Ю. А. Хохлова, Д. А. Ищенко, М. А. Хохлов, 2017



Рис. 2. Прибор «Микрон-гамма» в процессе записи диаграммы непрерывного внедрения индентора в тестируемый материал

логий Аэрокосмического института Национального авиационного университета.

Результатом измерения является получение записи диаграммы непрерывного внедрения индентора в режиме нагружение–разгрузка и программного компьютерного расчета значений микротвердости по Мейеру, модуля упругости Юнга, коэффициента пластичности и др. Во время испытаний регистрируется зависимость глубины внедрения индентора от нагрузки как при ее увеличении, так и при уменьшении, что позволяет получить значения невосстановленной твердости и исключает влияние упругого восстановления материала на фактическое значение микротвердости.

Технические характеристики прибора: максимальная нагрузка на индентор 500 г; погрешность по нагрузке 0,001 г; погрешность по глубине внедрения индентора 5 нм; максимальная глубина индентирования 200 мкм. Погрешность измерений составляет 100 нм и определяется, главным образом, неточностью начала отсчета глубины отпечатка, что зависит от геометрических параметров индентора, в частности от размера скругления (притупления) вершины трехгранного ин-

дентора. Точность измерений обеспечивается предварительным индентированием калибровочного образца и ежегодной «ювелирной» заточкой алмаза под стандарт. Подготовку образцов для индентирования обычно проводят в соответствии со стандартной процедурой полировки до образования зеркальной поверхности и без травления, что исключает формирование микрошероховатостей, влияющих на точность испытания.

При обычных испытаниях на твердость, например, на приборе ПМТ-3, с помощью алмазного четырехгранного индентора Виккерса измеряют размер отпечатка, твердость находят как отношение нагрузки (приложенной к индентору) к площади отпечатка. Недостатком такого подхода является то, что отпечаток измеряется после испытаний, т. е. теряется информация о механическом поведении материала в процессе испытаний. Поэтому для определения физико-механических свойств материалов широко применяется метод испытаний на твердость по глубине отпечатка. Во время таких испытаний регистрируется зависимость перемещения алмазного индентора от нагрузки как при ее увеличении, так и при ее уменьшении. Перемещение индентора замеряется со сверхвысокой точностью, что позволяет проводить испытания при малых нагрузках и небольших глубинах отпечатка. В результате отпадает необходимость в трудоемком ненадежном измерении размеров отпечатка, полученного при малых нагрузках на индентор. Информация о глубине отпечатка под нагрузкой позволяет исключить влияние упругого восстановления на величину твердости. Твердость, измеренная по невосстановленному отпечатку с регистрацией его глубины под нагрузкой (невосстановленная твердость), не равна твердости, измеренной по восстановленному (разгруженному) отпечатку с помощью микроскопа (восстановленная твердость).

Теоретические основы метода определения твердости и модуля упругости по результатам индентирования. Развитие метода испыта-

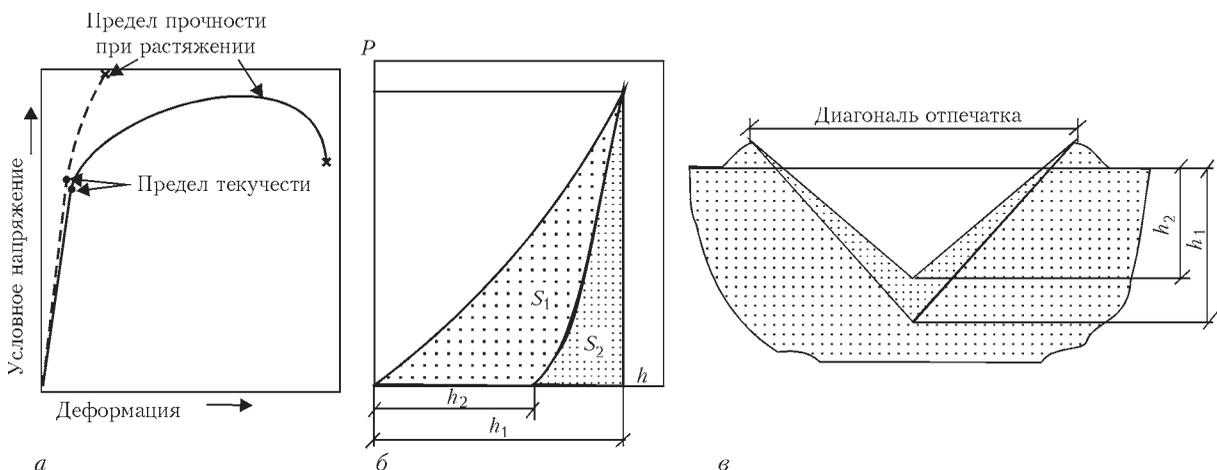


Рис. 3. Диаграмма «напряжение–деформация» при испытании на предел прочности (а) и диаграмма «нагружение–разгрузка» (б) при индентировании; в – профиль отпечатка индентора в материале

ния непрерывным вдавливанием индентора качественно можно сравнить с развитием испытания на растяжение [4], когда был сделан переход от простого испытания на разрыв к регистрации непрерывной диаграммы «напряжение–деформация» (рис. 3, а). По сути, диаграмма «нагрузка–разгрузка» (рис. 3, б) представляет собой работу, затраченную индентором на преодоление сопротивления материала (площадь под ветвью нагружения S_1), и работу, затраченную материалом на восстановление своих свойств (площадь под ветвью разгрузки S_2).

Таким образом, твердость рассчитывается по первой ветви диаграммы – зависимости глубины внедрения индентора от нагрузки, – а так как процесс разгрузки индентора является упругим, по кривым разгрузки определяется модуль упругости.

Современный анализ диаграммы внедрения индентора основан на решении Снеддона задачи об упругом контакте индентора с плоской поверхностью, которое связывает нагрузку, упругое перемещение индентора и площадь контакта любого штампа, который может быть описан как тело вращения. Это решение можно записать в следующем виде:

$$P = \alpha h^m,$$

где h – упругое перемещение индентора; α и m – константы.

Значения показателя экспоненты удалось вычислить только для некоторых симметричных штампов, в частности, для плоского цилиндра $m = 1$, для острого конуса $m = 2$, для сферы в пределе малых перемещений и для параболоида вращения $m = 1,5$. Основываясь на решении Снеддона для кривой упругой разгрузки как осесимметричных, так и пирамидоидальных штампов, запишем:

$$S = dP/dh = 2/\sqrt{\pi} E_r \sqrt{A}.$$

Здесь $S = dP/dh$ – экспериментально измеренная жесткость верхней части кривой разгрузки; A – площадь проекции упругого контакта; E_r – приведенный модуль упругости, который задается следующим уравнением:

$$1/E_r = ((1 - \nu^2)/E) + ((1 - \nu_i^2)/E_i),$$

где E и ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона для образца; ν_i и E_i – эти же параметры для индентора.

Для нахождения твердости и модуля упругости образца по результатам испытания с записью диаграммы нагружения индентора необходимо знать площадь проекции отпечатка. Площадь проекции можно вычислить по глубине отпечатка при максимальной нагрузке. Но проблема заключается в том, что прибор измеряет не глубину отпечатка, а перемещение индентора h , которое является суммой двух слагаемых:

$$h = h_c + h_s, \quad (1)$$

где h_c – глубина отпечатка; h_s – упругий прогиб поверхности образца на краю отпечатка.

Следовательно, чтобы найти глубину отпечатка, необходимо сначала найти упругий прогиб поверхности образца в месте контакта. В работе [2] для нахождения величины упругого прогиба авторы использовали решение Снеддона. Они показали, что при максимальной нагрузке упругий прогиб поверхности образца на краю отпечатка будет:

$$h_s = \varepsilon P_{\max} / S, \quad (2)$$

где $\varepsilon = 1$ для случая плоского штампа, для параболоида вращения $\varepsilon = 0,75$, а для острого конуса $\varepsilon = 0,72$.

Жесткость контакта S определяется по кривой разгрузки индентора, поэтому глубину отпечатка при максимальной нагрузке на индентор можно найти из уравнений (1) и (2).

Теперь, зная глубину контакта, можно найти площадь проекции отпечатка A . Для идеально острого индентора Берковича

$$A = 24,5 (h_c)^2.$$

Найдем модуль упругости образца:

$$E = \sqrt{\pi} (dP/dh) / \left(2\sqrt{(24,5 h_c^2)} \right)$$

и твердость по глубине отпечатка под максимальной нагрузкой:

$$H = P_{\max} / A.$$

Таким образом, по диаграмме внедрения индентора определяется величина нанотвердости материалов по методу Оливера и Фарра.

Оценка степени упрочнения материалов по результатам индентирования. Отношение твердости материала H к его модулю упругости Юнга E (H/E) удобно применять для быстрой и эффективной оценки степени упрочнения материалов. Величина H/E характеризует способность материала изменять свою форму и размер в процессе деформации, а также может служить качественной сравнительной характеристикой сопротивления материалов деформации при механическом нагружении и таким образом, отображать его структурное состояние: $H/E < 0,04$ – крупнокристаллические металлы и сплавы; $H/E \approx 0,05 \dots 0,09$ – мелкокристаллические и наноматериалы, интенсивно-деформированные, мультифазовые, керамика, покрытия, пленки; $H/E \geq 0,1$ – аморфное или аморфно-кристаллическое состояние материала.

Примеры исследования материалов с особыми свойствами. Индентирование позволяет исследовать материалы с тонкой структурой, локальным градиентом свойств, материалы в состоянии интенсивной пластической деформации или после термического воздействия, сверхтвердые, хрупкие, эластичные, а также материалы с ячеистой

структурой, физико-механические свойства которых невозможно определить иными способами [5, 6].

Хрупкие материалы. Так, в исследуемом образце детского зуба премоляра (рис. 4) поверхность области «Эмаль 1» (цилиндрическая плоскость между соседними зубами) и более чем в два раза тверже по сравнению с более изношен-

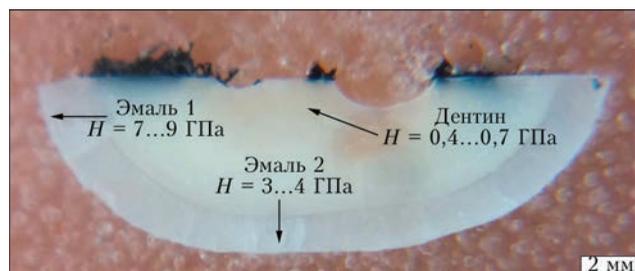


Рис. 4. Распределение твердости в основных зонах горизонтального среза детского зуба премоляра [7, 8]

ной и поврежденной внешней областью «Эмаль 2». Дентин на порядок мягче эмали.

Сверхэластичные материалы. Упругое восстановление таких сверхупругих материалов, как углерод-углеродный композит, чаще всего не позволяет оптически зафиксировать отпечатки (рис. 5, а) на углеродном волокне и в матрице, поэтому исследовать локальные свойства таких материалов можно только индентированием с записью диаграммы и автоматическим расчетом значений твердости и модуля упругости. Типичная диаграмма индентирования сверхэластичных материалов (рис. 5, б) – это ветвь диаграммы разгрузки, которая почти повторяет ветвь нагрузки, что характеризует восстанавливаемость изначальной формы материала.

Материалы с ячеистой структурой. На рис. 6 показан способ определения физико-механиче-

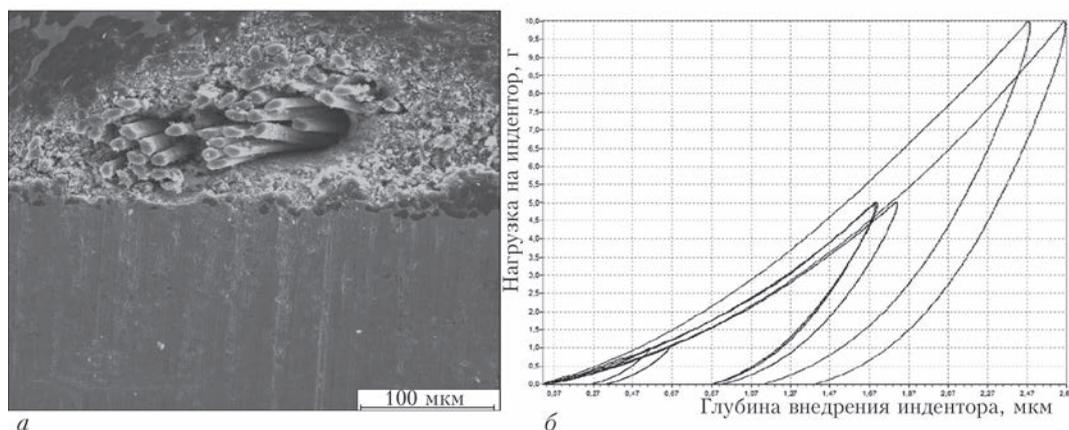


Рис. 5. Микроструктура углерод-углеродного композита (а) и диаграммы его индентирования при нагрузках 1; 5 и 10 г (б)

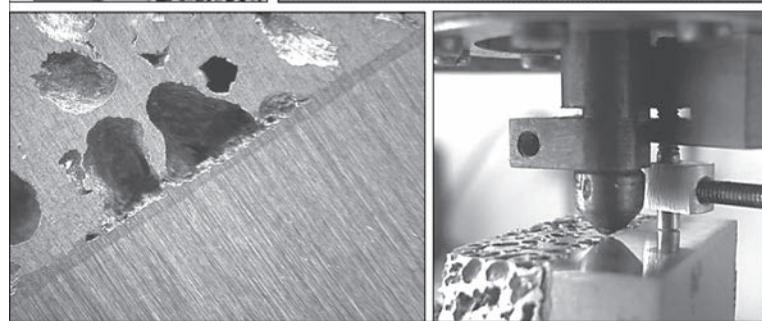
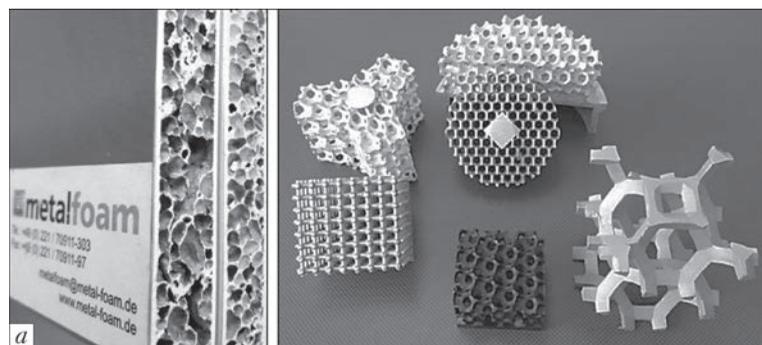


Рис. 6. Ячеисто-пористые материалы (а) и испытания образца биметаллического соединения пористый + монолитный сплав (б)

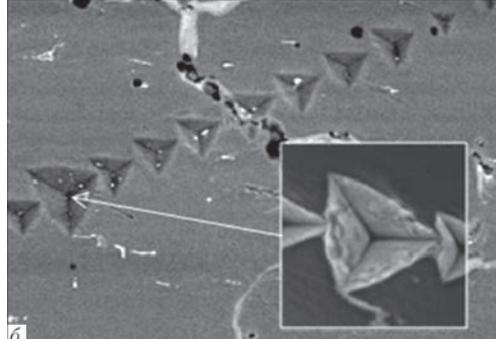
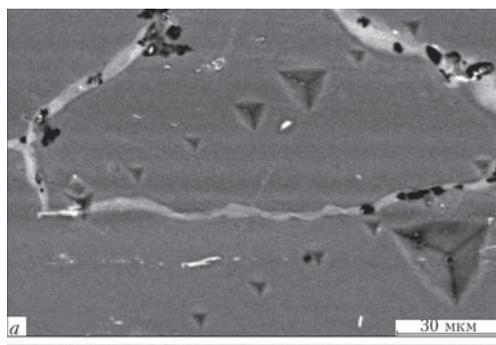


Рис. 7. Отпечатки индентора Берковича поперек зерна микроструктуры алюминиевого сплава

ских свойств ячеисто-пористых материалов на примере индентирования приконтактной зоны биметаллического диффузионного соединения пористого сплава с монокристаллическим.

Материалы с локальным градиентом химических свойств. Прибор «Микрон-гамма» при

стандартной для алюминиевых сплавов нагрузке на индентор 20 г и шагом индентирования 30 мкм позволяет фиксировать градиент изменения механических свойств во внутризеренной области микроструктуры (рис. 7, а) и находить объекты структуры в твердо-жидком состоянии (рис 7, б).

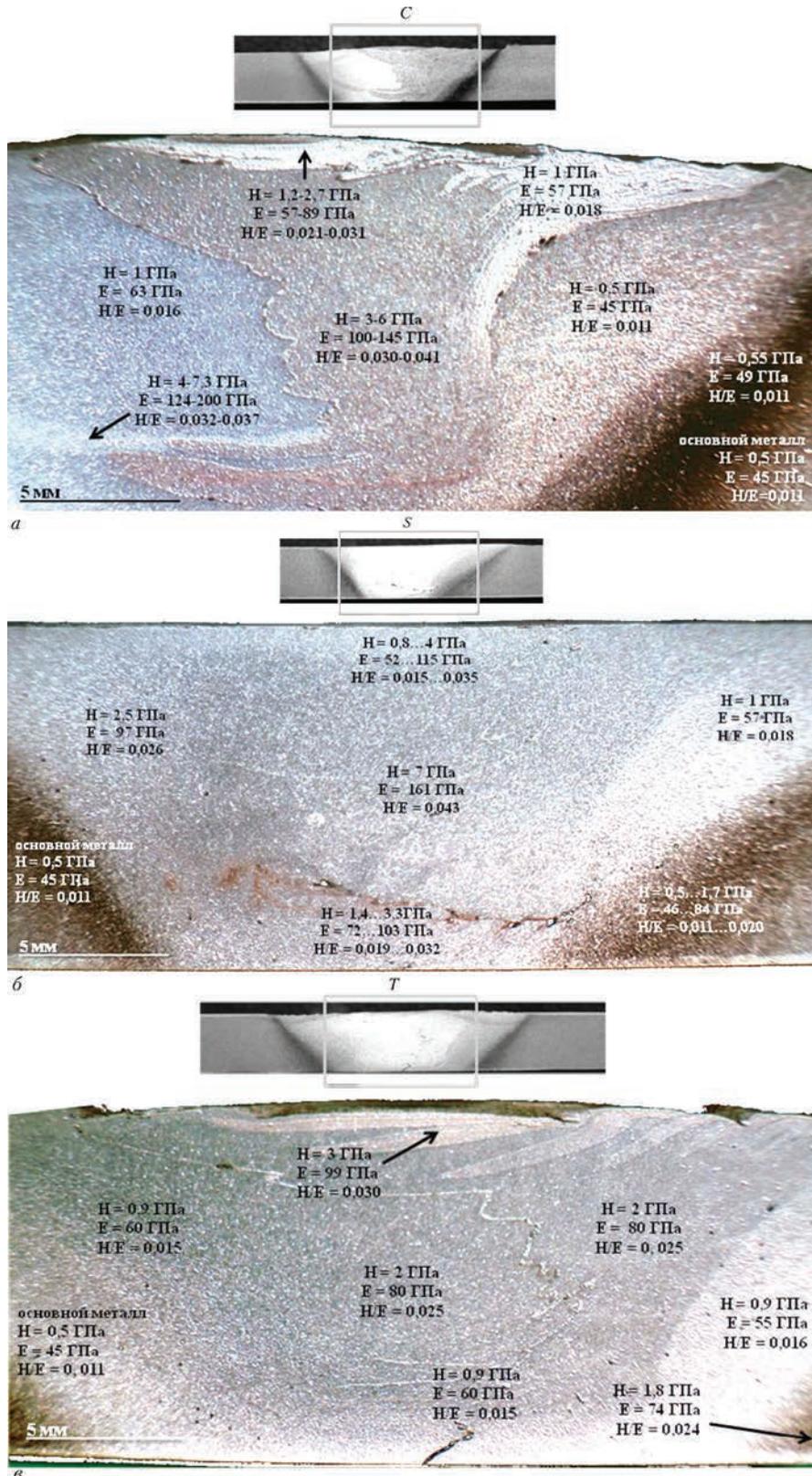


Рис. 8. Сварные швы, полученные сваркой трением с перемешиванием с использованием различных типов наконечников: а – С; б – S; в – Т

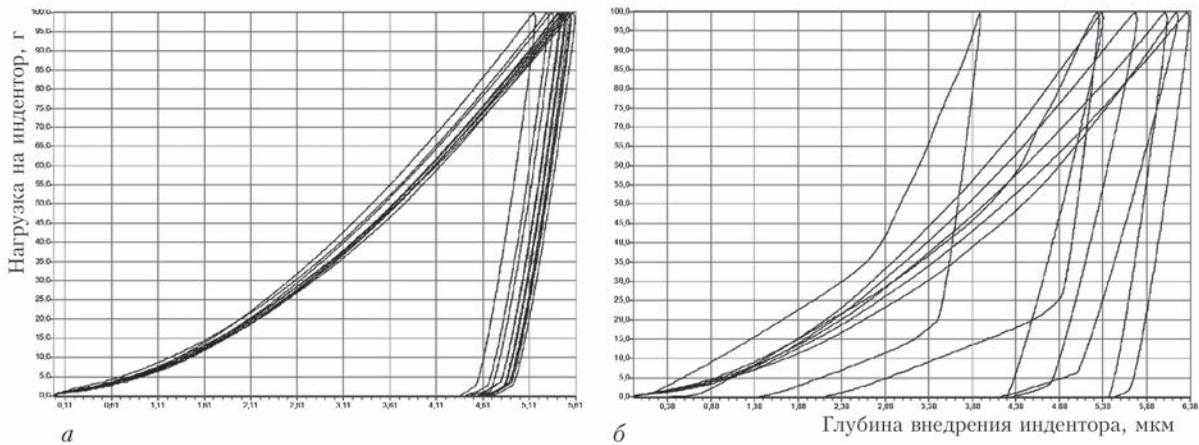


Рис. 9. Диаграммы индентирования основного металла (а) и нижней части ядра сварного шва, полученного с использованием наконечника Т типа (б)

Градиентные зоны в состоянии интенсивной пластической деформации. С макронагрузкой на индентор (100 г) были протестированы стыковые сварные швы алюминиевых листов толщиной 8 мм, полученные сваркой трением с перемешиванием и с использованием различных по форме типов наконечников (рис. 8): С – конусного; S – цилиндрического; T – с пазами. Определены локальные зоны ядра сварных швов, полученных при использовании наконечников С и S типа с приближенным к наноразмерному измельчению структуры в результате интенсивной скручивающей деформации – соотношение H/E более 0,04. На рис. 9 показано различие в диаграммах индентирования основного металла и зоны под ядром сварного шва, полученного при использовании наконечника Т типа.

Выводы

Индентирование является наиболее точным, теоретически и экспериментально подтвержденным и стандартизированным методом определения микротвердости и модуля упругости Юнга для исследования физико-механических свойств материалов с тонкой структурой и локальным градиентом свойств, материалов в состоянии интенсивной пластической деформации или после термического воздействия, а также сверхтвердых, сверххрупких и сверхэластичных материалов, механические свойства которых невозможно определить иными способами. Во время испытаний регистрируется зависимость глубины внедрения индентора от нагрузки как при увеличении нагрузки, так и при ее уменьшении, что позволяет получить значения невозстановленной твердости и исключает влияние упругого восстановления материала на фактическое значение микротвердости. Отношение твердости материала к его модулю упругости удобно применять для быстрой и эффективной оценки степени упрочнения или разупрочнения материалов.

Список литературы

1. Kazuhisa Miyoshi. NASA/TM-2002-211497 Surface Characterization Techniques: An Overview. (2002) P. 12–22.
2. Oliver W. C., Pharr G. M. An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – № 7. – P. 1564–1583.
3. Nano indenters from micro star technologies. Revision 2.3. P.9. (<http://www.microstartech.com/index/NANOINDENTERS.pdf>).
4. Верификация определения модуля Юнга с помощью микросондовой системы «Микрон-гамма» / Хохлова Ю. А. и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2009. – №1. – С. 30-32.
5. Ищенко А. Я., Хохлова Ю. А. Оценка механических свойств микроструктурных объектов сварных соединений // Автоматическая сварка. – 2009. – № 1. P. 44–47.
6. Nanoindentation of micro weld formed through thin nanolayered filler / J. Khokhlova et al. // Nanomechanical analysis of high performance materials. – Solid mechanics and its applications. Springer book. – 2014. – Vol. 203. – P. 251–262.
7. Сороченко Г. В. Вивчення механічних властивостей емалі постійних зубів в період вторинної мінералізації методом наноіндентування // Вісник наукових досліджень. – 2015. – № 4. – С. 81–83.
8. Сороченко Г. В. Дослідження змін нанотвердості емалі постійних зубів в період вторинної мінералізації під впливом різних за складом засобів екзогенної профілактики карієсу // The scientific heritag. – 2016. – № 6(6). – С. 36–42.

References

1. Kazuhisa Miyoshi. NASA/TM-2002-211497 Surface Characterization Techniques: An Overview. (2002) P. 12–22. (rezhim dostupa: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020070606.pdf>).
2. Oliver W. C., Pharr G. M. An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – № 7. – P. 1564–1583.
3. Nano indenters from micro star technologies. Revision 2.3. P.9. (<http://www.microstartech.com/index/NANOINDENTERS.pdf>).
4. Verification of Young modulus measurement by nanoindenter «Micron-gamma» / Yu. A. Khokhlova et al. // Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol – 2009. – № 1. – P. 30–32. [in Russian].
5. Ishchenko A. Ya., Khokhlova Yu. A. Evaluation of mechanical properties of microstructural constituents of welded joints // The Paton Welding Journal. – 2009. – № 1. – P. 34–37. [in Russian].
6. Nanoindentation of micro weld formed through thin nanolayered filler / J. Khokhlova et al. // Nanomechanical analysis of high performance materials. – Solid mechanics and its applications. Springer book. – 2014. – Vol. 203. – P. 251–262.
7. Sorochenko H. V. Vyvchennia mekhanichnykh vlastyvoستي emali postiinykh zubiv v period vtorynnoi mineralizatsii

sii metodom nanoindentuvannia // Visnyk naukovykh doslidzhen. – 2015. – № 4. – S. 81–83. [in Ukrainian].

8. Sorochenko H. V. Doslidzhennia zmin nanotverdosti emali postiinykh zubiv v period vtorynnoi mineralizatsii pid vplyvom riznykh za skladom zasobiv ekzohennoi profilaktyky kariiesu // The scientific heritag. – 2016. – № 6(6). – S. 36–42. [in Ukrainian].

Ю. А. ХОХЛОВА, Д. А. ИЩЕНКО, М. А. ХОХЛОВ

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

ІНДЕНТУВАННЯ ВІД МАКРО- ДО НАНОМЕТРОВОГО РІВНЯ І ПРИКЛАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ З ОСОБЛИВОЮ СТРУКТУРОЮ

Індентування є найбільш точним, теоретично і експериментально підтвердженим стандартизованим методом визначення фізико-механічних властивостей мікро- і нанометрового рівня для матеріалів з тонкою структурою, локальним градієнтом властивостей, матеріалів в стані інтенсивної пластичної деформації або після термічного впливу, а також надтвердих, крихких і еластичних матеріалів, механічні властивості яких неможливо визначити іншими способами. Методологія визначення прецизійними засобами розробляється в рамках перспективного наукового напрямку, який можна назвати механікою нанотестування. Бібліогр. 8, рис. 9.

Ключові слова: фізико-механічні властивості, наноіндентування, мікроіндентування, твердість, модуль пружності Юнга, зміцнення

Yu. A. KHOKHLOVA, D. A. ISHCHEKNO, M. A. KHOKHLOV

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevych str., 03680, Kiev. E-mail: office@paton.kiev.ua

INDENTATION FROM MACRO TO NANO AND EXAMPLES OF STUDIES OF THE PROPERTIES OF MATERIALS WITH SPECIAL STRUCTURE

Indentation is the most accurate, theoretically and experimentally confirmed standardized method for determination of physical and mechanical properties on micro- and nanometer level for materials with a fine structure, local gradient of properties in the state of intensive plastic deformation or after thermal impact, as well as superhard, brittle and elastic materials, mechanical properties of which cannot be determined by other processes. Methodology of determination by precision means is developed within a promising research field, which can be called nanotesting mechanics. 8 References, 9 Figures.

Keywords: physico-mechanical properties, nanoindenting, micro-indenting, hardness, Young's modulus of elasticity, strengthening

Поступила в редакцію
19.12.2016

Ежегодная конференция-выставка «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2017».

«Ассоциация «ОКО», 17–18 мая 2017 г.

Конференция нацелена на работу по обмену информацией о достижениях в области средств неразрушающего контроля, методических разработок, а также на определение перспективных путей сотрудничества при создании новой техники и технологий, установление деловых и коммерческих контактов. Участники конференции смогут ознакомиться с новыми достижениями и наработками по НК по следующим направлениям:

● Железная дорога (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство) ● Атомная энергетика, тепловая энергетика ● Нефтегазовая отрасль и трубопроводный транспорт ● Авиастроение и техническое обслуживание летательных аппаратов ● Металлургия ● Машиностроение ● Организация обучения и сертификации персонала по НК металла в соответствии с международными стандартами.

На специализированной выставке будут представлены приборы и установки НК, разработанные и произведенные предприятиями «Ассоциации «ОКО»: НПФ «Ультракон-сервис», НПФ «Промприлад», УкрНИИНК (Украинским научно-исследовательским институтом неразрушающего контроля).

Приглашаем Вас посетить конференцию-выставку «Неразрушающий контроль-2017». Участники конференции смогут принять участие в обсуждении докладов, выступить с сообщениями по актуальным проблемам НК.

Место проведения конференции: г. Киев, ул. Набережно-Луговая, 8.

По вопросам участия просим обращаться в оргкомитет:

Тел./факс: (044) 531-37-27, 531-37-26

Тел.моб.: +38 (067) 858-98-53, +38 (097) 975-99-90

www.ndt.com.ua/conf

E-mail: lia-lia_2004@mail.ru, vvkorni@ndt.com.ua

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Л. І. МУРАВСЬКИЙ, Т. І. ВОРОНЯК, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, В. Р. ДЖАЛА, О. Г. КУЦЬ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів-60, вул. Наукова, 5. E-mail: murav@ipm.lviv.ua

Розглянуто основні принципи побудови переносного апаратно-програмного комплексу для неруйнівного контролю композитних елементів конструкцій авіаційної техніки. У переносному апаратно-програмному комплексі будуть поєднані засоби електронної спекл-інтерферометрії, спекл-метрології, цифрової кореляції зображень та надвисокочастотного неруйнівного контролю, оптимізацію і синхронізацію яких буде реалізовано за допомогою відповідного програмно-апаратного забезпечення. Комплекс створюється з метою розроблення на його основі нових методик контролю і діагностики композитних елементів конструкцій та металокомпозитних з'єднань авіаційної техніки. Розроблені методики дадуть можливість підвищити надійність та ресурс роботи композитних елементів конструкцій та металокомпозитних з'єднань завдяки виявленню внутрішніх дефектів у композитних елементах конструкцій, аналізу тривимірних полів переміщень контактних поверхонь у з'єднаннях «метал – композит» за механічного навантаження та ультразвукового або теплового збудження, оцінюванню ступеня пошкодження і змінання елементів з'єднань. Бібліогр. 21, рис. 6.

Ключові слова: неруйнівний контроль, електронна спекл-інтерферометрія, ультразвук, надвисокочастотна діагностика, цифрова кореляція зображень, приховані дефекти, композитні матеріали

Переносний апаратно-програмний комплекс (ПАПК) для неруйнівного контролю (НК) композитних елементів конструкцій авіаційної техніки створюється з метою розроблення нових методик контролю і діагностики композитних елементів конструкцій та металокомпозитних з'єднань авіаційної техніки для підвищення надійності та ресурсу їх роботи на основі виявлення внутрішніх дефектів у композитних елементах конструкцій, аналізу тривимірних полів переміщень контактних поверхонь у з'єднанні метал–композит за механічного навантаження та ультразвукового (УЗ) або теплового збудження, оцінювання ступеня пошкодження і змінання елементів з'єднань засобами спекл-метрології, цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) та надвисокочастотного (НВЧ) НК. Під час побудови комплексу будуть використані результати досліджень, наведені у працях [1–5].

Комплекс міститиме гібридну оптико-цифрову систему (ОЦС) визначення тривимірних полів переміщень і деформацій та виявлення пошкоджень і внутрішніх дефектів у композитах та місцях з'єднань, а також апаратуру НВЧ діагностики внутрішніх дефектів і неоднорідностей. У гібридній ОЦС буде поєднано оптико-цифровий корелятор зображень для формування поперечних полів переміщень поверхні з електронним спекл-інтерферометром для формування поздовжніх полів переміщень біля місць з'єднань та виявлення вну-

трішніх дефектів і пошкоджень за механічних навантажень та УЗ збудження. Апаратура НВЧ діагностики дасть змогу виявляти внутрішні дефекти і структурні неоднорідності у шарах композитних елементів шляхом вимірювання коефіцієнта відбивання відбитої зондувальної хвилі методом лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) з перетворенням частоти.

На основі розроблених методик буде запропоновано нову технологію зміцнення отворів у композиті для підвищення надійності роботи з'єднання. Розроблені методики, технічні засоби і технологія зміцнення отворів у композиті дадуть можливість підвищити достовірність діагностування з'єднань композит–метал за реальних умов навантаження та оцінювати їх надійність і довговічність для підвищення безпеки польотів літальних апаратів.

Розроблення гібридних оптико-акустичних методів і засобів виявлення дефектів у композитах почалось ще у 1990-х роках. Зокрема, були проведені дослідження з виявлення внутрішніх дефектів і розшарувань у композитах, що базувались на використанні адитивно-субтрактивної електронної спекл-інтерферометрії (ЕСІ) та гармонічного УЗ збудження [6–8]. Були проведені дослідження, у яких використовували для виявлення внутрішніх дефектів синхронізовану різницеву ЕСІ у поєднанні з УЗ або тепловим збудженням [9–11].

© Л. І. Муравський, Т. І. Вороняк, Я. Л. Іваницький, В. Р. Джала, О. Г. Куць, 2017

У роботі приймали участь Г. І. Гаськевич, І. С. Голинський, І. В. Стасишин

Однак тут основну увагу звертали на виявлення лише тестових внутрішніх дефектів, які попередньо вводили в композит.

Дослідження пошкоджуваності з'єднань композит–метал здійснюють різними методами, оскільки проблема оцінювання їх опірності руйнуванню та довговічності є надзвичайно актуальною. Особливу увагу звертали на процес руйнування з'єднань композит–метал, який характеризують трьома основними видами – розривом, зминанням і відколом. На сьогодні для вивчення параметрів руйнування таких з'єднань застосовують як аналітичні методи, зокрема метод скінченних елементів [12–14], так і експериментальні з використанням тензодатчиків [12, 15, 16], явища фотопружності [12], ЕСІ [15] та двовимірної (2D) [17, 18] і тривимірної (3D) ЦКЗ [19]. Дослідження проводять для з'єднань з одним болтом [14, 19] і з декількома [13, 20], причому вивчають також вплив розмірів болтів на міцність конструкції [16].

Зауважимо, що прямий аналог запропонованої ОЦС відсутній, оскільки у ній передбачено одночасне використання методів ЕСІ та ЦКЗ як для виявлення внутрішніх дефектів та розшарувань у композитах та у місцях з'єднань композит–метал, так і для діагностування напружено-деформованого стану таких з'єднань. Функціональна схема гібридної ОЦС, що буде входити до ПАПК, показана на рис. 1. Оптична частина гібридної ОЦС побудована за схемою інтерферометра Тваймана–Гріна, який містить лазер неперервної дії 1, розширювач лазерного променя 2, світлоподільник 3, опорне дзеркало 4. Спекл-інтерферограму (СІ), що формується в інтерферометрі як результат інтерференції опорного променя (відбитого від дзеркала 4) та предметного (відбитого від ОК),

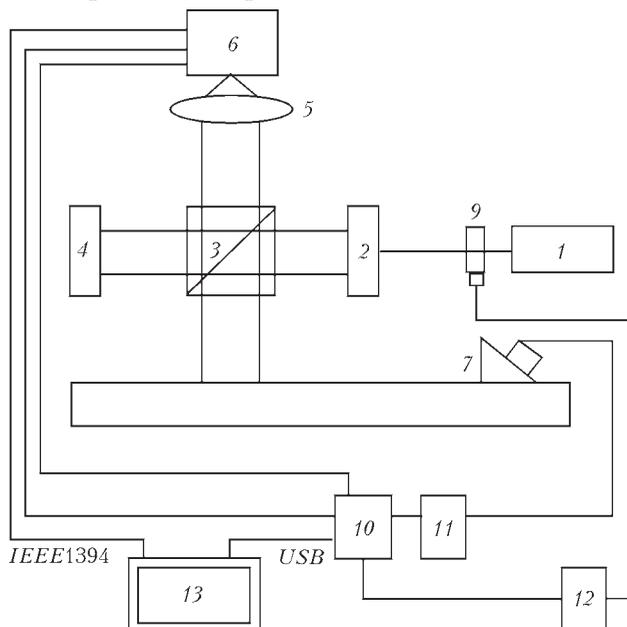


Рис. 1. Функціональна схема гібридної ОЦС

реєструють за допомогою об'єктива 5 та цифрової камери 6. УЗ збудження ОК 8 здійснюють за допомогою УЗ джерела 7, що містить УЗ випромінювач та клиноподібну призму (рис. 2) та генерує в ОК короткі імпульси або гармонічні хвилі в діапазоні від 10 до 200 кГц. Для формування короткочасних лазерних імпульсів тривалістю порядку одиниць мікросекунд використовують акустооптичну комірку 9.

Керування режимами роботи ОЦС забезпечує контролер 10, використовуючи для цього електронні блоки синхронізації УЗ джерела та акустооптичної комірки (11 і 12 відповідно). Зареєстровані СІ вводять в комп'ютер 13 для подальшої обробки. Для створення картин кореляційних смуг (різницевої СІ) за методом різницевої ЕСІ формують першу СІ досліджуваної ділянки об'єкту контролю (ОК) у незбудженому стані, а другу – у стані УЗ збудження.

Щоб зменшити спекл-шуми у різницевої СІ, формують декілька пар таких картин за різних значень фази опорного променя. Додаючи ці картини, використовують ефект накопичення, завдяки якому рівень спекл-шумів, що мають випадковий характер, знижується.

Режим роботи гібридної ОЦС під час виявлення внутрішніх дефектів у композитах та з'єднаннях композит–композит і композит–метал можна умовно поділити на два етапи. На першому досліджувана ділянка аналізується за імпульсного УЗ збудження та інтенсивного неперервного або імпульсного лазерного освітлення ОК. Під час використання імпульсного випромінювання необхідно синхронізувати момент імпульсу лазерного випромінювання з моментом імпульсу УЗ збудження. Джерело УЗ збудження містить УЗ випромінювач із клиноподібною призмою для створення поверхневої хвилі у ОК та керованого УЗ генератора. Цей етап дає можливість виявити усі дефекти в полі зору інтерферометра, оскільки завдяки широкому діапазону спектра УЗ збудження кожен дефект буде проявлятися завдяки наявності у цьому спектрі резонансних частот для даного дефекту. В результаті сумування різницевої СІ формують картину дефектів по всьому полю спостереження ОК. Такий режим роботи дає можливість здійснювати швидкісний попередній НК

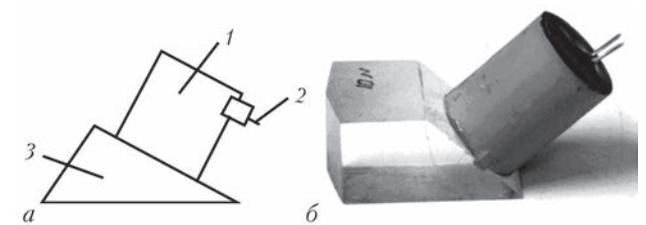


Рис. 2. Схема (а) та загальний вигляд (б) перетворювача для вводу УЗ в ОК: 1 – вузол випромінювача і демпфування; 2 – контакти підключення; 3 – призма-хвилевід

всього композиту або елемента конструкції на предмет наявності або відсутності дефектів у ОК.

Другий етап необхідний для більш детального дослідження усіх виявлених на першому етапі дефектів, зокрема визначення їх розмірів та уточнення місць локалізації. На другому етапі використовують гармонічні сигнали УЗ збудження, причому частоту збудження плавно сканують в сторону збільшення або зменшення з метою вибору резонансної частоти для вибраного дефекту. Для реєстрації моментів досягнення мінімальних і максимальних значень синусоїдального УЗ збудження використовують акустооптичну комірку, яка працює як засув і у ці моменти відкриває лазерний промінь. Формуючи в реальному часі послідовність різницевих СІ і сумуючи їх, оцінюють розміри дефекту та його локалізацію.

На рис. 3 показана часова діаграма роботи ОЦС у режимі гармонічного УЗ збудження. Спочатку фіксується зображення фрагменту досліджуваної поверхні без УЗ навантаження (Кадр 1). Наступним етапом є фіксація зображення того ж фрагменту за УЗ навантаження (Кадр 2). Освітлення відбувається імпульсами синфазно з сигналом УЗ навантаження. Після збереження даних у комп'ютері відбувається обробка і вивід результату на екран.

Паралельно з реєстрацією СІ безпосередньо у інтерферометрі можна організувати режим реєстрації спекл-зображень за відсутності опорного променя. Інший спосіб полягає у виділенні спекл-зображень із зареєстрованих СІ безпосе-

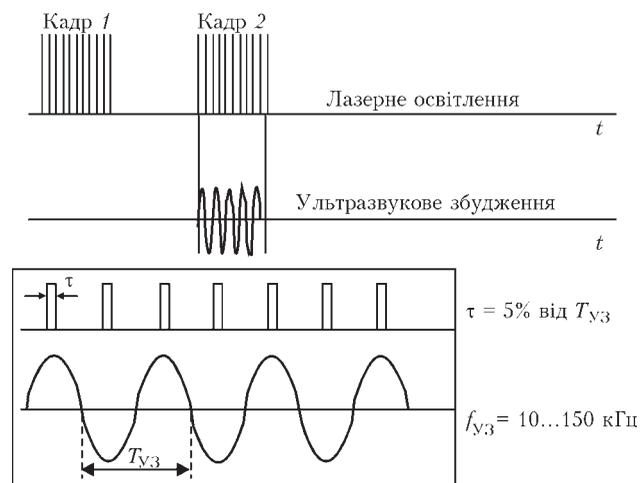


Рис. 3. Діаграма збору даних в ОЦС



Рис. 4. Приклади зображень, що використовуються під час роботи ОЦС: а – спекл-зображення; б – СІ; в – кореляційні смуги

редньо у комп'ютері, використовуючи для цього відомі алгоритми трансформації СІ [1]. За допомогою спекл-зображень початкової і деформованої поверхні можна побудувати поля поперечних переміщень поверхні за допомогою одного з методів ЦКЗ [21].

На рис. 4 наведено приклад спекл-зображення (а), СІ (б) та картини кореляційних смуг, отриманої методом різницевої ЕСІ на ділянці поверхні композитного зразка з виявленим змінанням біля круглого отвору (в). Тобто, деякі приховані дефекти можна виявляти лише методом різницевої ЕСІ, використовуючи для цього картини кореляційних смуг, що отримані за певних умов навантаження ОК – механічного, теплового чи УЗ.

До недавнього часу застосування методів і засобів радіохвильового (РХ) НВЧ НК в основному обмежувалося лабораторними взірцями і одиничними зразками апаратури. Проте в останні роки у зв'язку з розвитком елементної бази мікрохвильової техніки з'явилися системи РХ НВЧ НК композитних елементів конструкцій для промислового застосування. Відомі розробки Applied Microwave Non destructive Testing Lab. (США) та Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing (Германія). Аналогом системи НВЧ НК, що розробляється, є SynView 3D Imaging System (Becker Photonik GmbH).

У запропонованому ПАПК робота апаратури НВЧ діагностики внутрішніх дефектів і неоднорідностей заснована на багаточастотному зондуванні електромагнітними хвилями НВЧ міліметрового діапазону, спектральному аналізу відгуку і побудові профілю внутрішньої структури матеріалу. Вимірювання коефіцієнта відбивання проводиться для всіх точок діапазону частот, потім будується часовий відгук структури (імпульсна характеристика) шляхом спектрального аналізу частотної залежності виміряного сигналу, причому максимумами відповідають просторовому положенню неоднорідності середовища з урахуванням оптичних властивостей матеріалу. Зображення ОК отримується шляхом сканування у площині апертури антени по одній або двох координатах.

Функціональна схема системи НВЧ діагностики показана на рис. 5 і складається з наступних вузлів:

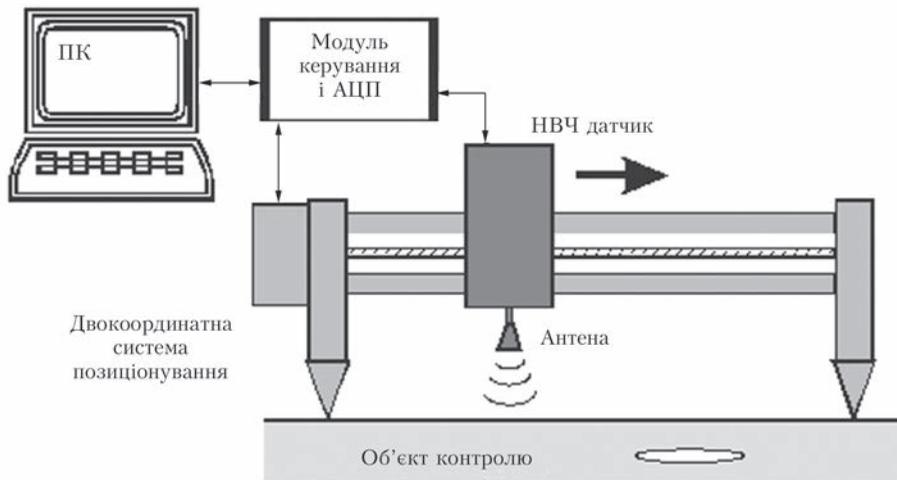


Рис. 5. Функціональна схема системи НВЧ діагностики композитних елементів

- НВЧ датчика, що опромінює ОК електромагнітними хвилями НВЧ діапазону та вимірює коефіцієнт відбивання;
- двокоординатної системи позиціонування датчика, що служить для сканування поверхні ОК;
- блока керування і аналогово-цифрового перетворення, що керує роботою датчика і позиціонера, отримує виміряні дані від НВЧ датчика і передає у ПК;
- ПК з відповідним програмним забезпеченням, що отримує дані вимірювання і інформацію про положення НВЧ датчика відносно ОК та будує радіохвильове зображення внутрішньої структури ОК.

Оскільки зображення ОК отримується шляхом сканування поверхні, ставиться вимога до швидкості вимірювання коефіцієнта відбивання, яка б забезпечила прийнятну продуктивність НК. Тому доцільним є використання НВЧ датчика з неперервною ЛЧМ і вимірюванням на проміжній частоті. Застосування НВЧ датчика за принципом ЛЧМ радара забезпечить швидкість вимірювання в точці поверхні не менше 1 кГц, відповідно швидкість сканування поверхні виробу з роздільною здатністю 1 мм буде 1 м/с. Альтернативний підхід полягає у використанні детекторного приймача НВЧ сигналу, де вимірюється потужність НВЧ поля у хвилеводі на фіксованій частоті за допомогою спеціальних

відгалужувачів (детекторних секцій) і квадратичних детекторів (діодів). Схема детекторного приймача більш громіздка, здійснює модуляцію потужності НВЧ поля та синхронне детектування, а також вимагає більше часу на вимірювання на одній частоті. Тому вона малопридатна для вимірювань, коли необхідна велика швидкість отримання даних на багатьох частотах.

Принцип роботи НВЧ датчика полягає у наступно-

му. Генератор, керований напругою, генерує ЛЧМ НВЧ сигнал, що надходить спочатку на підсилювач потужності, потім на помножувач частоти, і таким чином частота несучого опорного сигналу модулюється у межах 92...95 ГГц. Далі сигнал через вентиль, смуговий фільтр і змішувач випромінюється у напрямку ОК. Відбитий від ОК сигнал через антенну систему надходить на змішувач із часовою затримкою τ , де перемножується з опорним сигналом. В результаті дії на змішувач двох сигналів – опорного і відбитого від ОК (рис. 6) – на виході змішувача отримуємо різницевий низькочастотний сигнал, частота і амплітуда якого залежать від коефіцієнта відбивання і відстані до ОК. Через підсилювач сигнал проміжної частоти надходить до аналогово-цифрового перетворювача. На рис. 6 наведено часову залежність зондувального (суцільна лінія) і відбитого (пунктирна лінія) гармонічних сигналів з періодом T від частоти носія ω . Час затримки відбитого сигналу можна визначити за формулою $\tau = 2R/c$, де R – віддаль від джерела НВЧ випромінювання до ОК, c – швидкість поширення електромагнітних хвиль.

Висновок

Створюваний ПАПК на відміну від відомих закордонних аналогів дасть змогу виявляти не лише тестові підповерхневі дефекти, але виявляти і аналізувати оперативні та експлуатаційні внутрішні дефекти у шаруватих композитних панелях та з'єднаннях композит-композит і композит-метал. Крім того, за його допомогою можна буде виявляти пошкодження та внутрішні дефекти у місцях таких з'єднань, які невидимі і закриті від спостереження шляпками болтів, заклепок тощо.

Список літератури

1. Муравський Л. І., Вороняк Т. І., Кметь А. Б. Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики: наук. ред. З. Т. Назарчук. – Львів: СПО-ЛОМ, 2014. – 272 с.

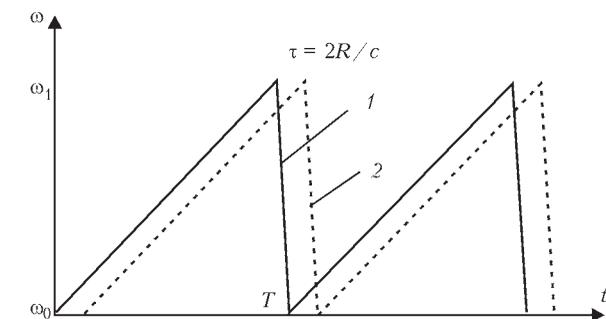


Рис. 6. Формування сигналу проміжної частоти у НВЧ датчику: 1 – зондувальний сигнал; 2 – відбитий від ОК сигнал

2. Muravsky L., Kmet' A., Voronyak T. Two approaches to the blind phase shift extraction for two-step electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 2013. – V. 52, № 10. – P. 101909 (1–8).
3. Назарчук З. Т., Джала В. Р., Синявський А. Т. Виявлення підповерхневих неоднорідностей у діелектричних матеріалах радіохвильовим надвисокошастотним методом // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – № 4. – С. 7–22.
4. Максименко О. П., Іваницький Я. Л., Гвоздюк М. М. Визначення жорсткості з'єднання композит–метал методом цифрової кореляції зображень // *Там же.* – 2014. – № 6. – С. 44–49.
5. Оптико-цифровий комплекс для мікродіагностики стану поверхні, деформацій та прихованих дефектів у композитних елементах авіаконструкцій / Л. І. Муравський та ін. // *Цільова компл. прогр. НАНУ «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: зб. наук. статей.* – Київ, 2012. – С. 71–75.
6. Pouet B. F., Krishnaswamy S. Additive/subtractive decorrelated electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 1993. – V. 32, № 6. – P. 1360–1369.
7. Pouet B. F., Chatters T., Krishnaswamy S. Synchronized reference updating technique for electronic speckle interferometry // *J. Nondestr. Eval.* – 1993. – V. 12, № 2. – P. 133–138.
8. Fomitchov P., Wang L.-S., Krishnaswamy S. Advanced image-processing techniques for automatic nondestructive evaluation of adhesively-bonded structures using speckle interferometry // *Ibid.* – 1997. – V.16, № 4. – P. 215–227.
9. Gerhard H., Busse G. Two new techniques to improve interferometric deformation-measurement: lockin and ultrasound excited speckle-interferometry // *Proc. Fringe 2005*, ed. W. Osten. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – P. 530–538.
10. Gerhard H., Busse G. Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing // *NDT & E International.* – 2006. – V. 39, № 8. – P. 627–635.
11. Menner P., Gerhard H., Busse G. Lockin-interferometry: principle and applications in NDE // *J. Mechanical Eng.* – 2011. – V. 57, № 3. – P. 183–191.
12. Three-dimensional investigation of thick single-lap bolted joints / F. Iancu et al. // *Exp. Mechanics.* – 2005. – V. 45, № 4. – P. 351–358.
13. Kradinov V., Madenci E., Ambur D. R. Combined in-plane and through-the-thickness analysis for failure prediction of bolted composite joints // *Compos. Struct.* – 2007. – V. 77, № 2. – P. 127–147.
14. Jam J. E., Ghaziani N. O. Numerical and experimental investigation of bolted joints // *Int. J. Eng. Sci. Technol.* – 2011. – V. 3, № 8. – P. 285–296.
15. McGinnis M. J., Pessiki S., Turker H. Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method // *Exp. Mechanics.* – V. 45, № 4. – P. 359–367.
16. Schajer G. S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // *Ibid.* – 2010. – V. 50, № 2. – P. 245–253.
17. Ascione F., Luciano F., Franco M. On the pin-bearing failure load of GFRP bolted laminates: An experimental analysis on the influence of bolt diameter // *Compos. Part B-Eng.* – 2010. – V. 41, № 6. – P. 482–490.
18. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints / A. B. Abibe et al. // *Mater. Design.* – 2013. – V. 46. – P. 338–347.
19. Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates / L. Adam et al. // *Compos. Struct.* – 2012. – V. 4, № 10. – P. 3082–3091.
20. Gamdani F., Boukhili R., Vadean A. Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates // *Mater. Design.* – 2015. – V. 88. – P. 702–712.
21. Муравський Л. І. Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів. – Київ: Наукова думка, 2010. – 208 с.
1. Muravskiy L. I., Vroniak T. I., Kmet A. B. Lazerna interferometriia poverkhni dlia potreb tekhnichnoi diahnostryky: nauk. red. NANU Z. T. Nazarchuk. – Lviv: SPOLOM, 2014. – 272 s. [in Ukraianian].
2. Muravsky L., Kmet' A., Voronyak T. Two approaches to the blind phase shift extraction for two-step electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 2013. – V. 52, № 10. – P. 101909 (1–8). [in Ukraianian].
3. Nazarchuk Z. T., Dzhalá V. R., Syniavskiy A. T. Vyiavlennia pidpoverkhnevikh neodnorodnostei u dielektrychnykh materialakh radiokhvyl'ovym nadvysokochastotnym metodom // *Fiz.-khim. mekhanika materialiv.* – 2013. – № 4. – S. 7–22. [in Ukrainian].
4. Maksymenko O. P., Ivanytskyi Ya. L., Hvozdiuk M. M. Vyznachennia zhorstkosti z'iednannia kompozyt–metal metodom tsyfrovoi koreliatsii zobrazhen // *Ibid.* – 2014. – № 6. – S. 44–49.
5. Optyko-tsyfrovyy kompleks dlia mikrodiahnostryky stanu poverkhni, deformatsii ta prykhovanykh defektiv u kompozytnykh elementakh aviakonstruksii / L. I. Muravskiyi ta in. // *Tsilova kompl. prohr. NANU «Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruksii, sporud ta mashyn»:* zb. nauk. statei. – Kyiv, 2012. – S. 71–75. [in Ukainian]
6. Pouet B. F., Krishnaswamy S. Additive/subtractive decorrelated electronic speckle pattern interferometry // *Opt. Eng.* – 1993. – V. 32, № 6. – P. 1360–1369.
7. Pouet B. F., Chatters T., Krishnaswamy S. Synchronized reference updating technique for electronic speckle interferometry // *J. Nondestr. Eval.* – 1993. – V. 12, № 2. – P. 133–138.
8. Fomitchov P., Wang L.-S., Krishnaswamy S. Advanced image-processing techniques for automatic nondestructive evaluation of adhesively-bonded structures using speckle interferometry // *J. Nondestr. Eval.* – 1997. – V.16, № 4. – P. 215–227.
9. Gerhard H., Busse G. Two new techniques to improve interferometric deformation-measurement: lockin and ultrasound excited speckle-interferometry // *Proc. Fringe 2005*, ed. W. Osten. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – P. 530–538.
10. Gerhard H., Busse G. Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing // *NDT & E International.* – 2006. – V. 39, № 8. – P. 627–635.
11. Menner P., Gerhard H., Busse G. Lockin-interferometry: principle and applications in NDE // *J. Mechanical Eng.* – 2011. – V. 57, № 3. – P. 183–191.
12. Three-dimensional investigation of thick single-lap bolted joints / F. Iancu et al. // *Exp. Mechanics.* – 2005. – V. 45, № 4. – P. 351–358.
13. Kradinov V., Madenci E., Ambur D. R. Combined in-plane and through-the-thickness analysis for failure prediction of bolted composite joints // *Compos. Struct.* – 2007. – V. 77, № 2. – P. 127–147.
14. Jam J. E., Ghaziani N. O. Numerical and experimental investigation of bolted joints // *Int. J. Eng. Sci. Technol.* – 2011. – V. 3, № 8. – P. 285–296.
15. McGinnis M. J., Pessiki S., Turker H. Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method // *Exp. Mechanics.* – V. 45, № 4. – P. 359–367.
16. Schajer G. S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities // *Ibid.* – 2010. – V. 50, № 2. – P. 245–253.
17. Ascione F., Luciano F., Franco M. On the pin-bearing failure load of GFRP bolted laminates: An experimental analysis on the influence of bolt diameter // *Compos. Part B-Eng.* – 2010. – V. 41, № 6. – P. 482–490.
18. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints / A. B. Abibe et al. // *Mater. Design.* – 2013. – V. 46. – P. 338–347.
19. Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates / L. Adam et al. // *Compos. Struct.* – 2012. – V. 4, № 10. – P. 3082–3091.
20. Gamdani F., Boukhili R., Vadean A. Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates // *Mater. Design.* – 2015. – V. 88. – P. 702–712.
21. Muravskiy L. I. Metody spekl-koreliatsii dlia doslidzhennia mekhanichnykh vlastyvostei konstruksiiynykh materialiv. – Kyiv: Naukova dumka, 2010. – 208 s. [in Ukrainian].

References

Л. И. МУРАВСКИЙ, Т. И. ВОРОНЯК, Я. Л. ИВАНИЦКИЙ,
В. Р. ДЖАЛА, А. Г. КУЦЬ

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН
Украины. 79060, г. Львов-60, ул. Научная, 5.
E-mail: murav@ipm.lviv.ua

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ
АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ
ТЕХНИКИ

Рассмотрены основные принципы построения переносного аппаратно-программного комплекса для неразрушающего контроля композитных элементов конструкций авиационной техники. В комплексе будут объединены средства электронной спекл-интерферометрии, цифровой корреляции изображений и сверхвысокочастотного неразрушающего контроля, оптимизация и синхронизация которых будет выполняться при помощи соответствующего программного обеспечения. Комплекс создается с целью разработки на его основе новых методик контроля и диагностики композитных элементов конструкций и металлокомпозитных соединений авиационной техники. Разработанные методики дадут возможность повысить надежность и ресурс работы элементов конструкций благодаря выявлению внутренних дефектов, анализу трехмерных полей перемещений контактных поверхностей и оценке степени повреждения и смятия элементов соединений. Библиогр. 21, рис. 6.

L. I. MURAVSKY, T. I. VORONYAK, YA. L. IVANYTSKY,
V. R. DZHALA, O. G. KUTS

Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS of Ukraine.
79060, Lviv-60, Naukova str., 5.
E-mail: murav@ipm.lviv.ua

PRINCIPLES FOR DEVELOPMENT
OF HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX
FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF AIRCRAFT
COMPOSITE STRUCTURAL COMPONENTS

The basic principles for development of a portable hardware-software complex for nondestructive testing of aircraft composite structural components are considered. This complex will combine means of electronic speckle interferometry, digital image correlation and microwave frequency nondestructive testing, which optimization and synchronization will be implemented with the help of the appropriate software. The complex is created to develop new techniques for monitoring and diagnostics of composite structural elements and composite or metal-composite joints in aircraft equipment. The developed techniques will allow increasing the reliability and lifetime of structural elements due to internal defects detection, analysis of three-dimensional displacement fields of contact surfaces and evaluation of damage and bearing stress in joints elements. 21 References, 6 Figures.

Надійшла до редакції
27.01.2017

Календарь выставок и конференций в 2017 г.

Дата	Место проведения	Название
4–7 апреля	Минск, Беларусь	17-я Международная специализированная выставка «Сварка и резка-2017»
25–28 апреля	С.-Петербург, Россия	18-я Международная выставка-конгресс по сварке, резке и родственным технологиям «Сварка/Welding-2017»
май	Киев, Украина ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	Сессия научного совета по новым материалам МААН
17–18 мая	Киев, Украина Ассоциация «ОКО»	Конференция «Неразрушающий контроль – 2017»
23–25 мая	Запорожье, Украина	5-я Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлургия. Сварка»
23–26 мая	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	9-я Международная конференция молодых ученых «Сварка и родственные технологии»
12–13 июня	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	Международная конференция «Роботизация и автоматизация сварочных процессов»
12–16 июня	Созополь, Болгария	Национальная конференция «Defectoscopya '2017» и другие мероприятия в рамках «NDT Days 2017»
25–30 июня	Шанхай, Китай	70-я Ассамблея Международного института сварки
11–15 сентября	Одесса, Украина	8-я Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»
25–29 сентября	Дюссельдорф, Германия	Международная эссенская выставка «Сварка и Резка-2017»
10–13 октября	Москва, Россия	17-я Международная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий «Weldex/Россварка»
21–24 ноября	Киев, Украина	16-й Международный промышленный форум-2017

РЕАЛІЗАЦІЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ АЛГОРИТМІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

Р. М. ГАЛАГАН, А. С. МОМОТ

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ-56, пр.-т Перемоги, 37.

E-mail: rgalagan@ukr.net

Розглянуто можливість застосування архітектури нейронної мережі АРТ-2 для розробки алгоритмів класифікації технічного стану композиційних матеріалів за результатами акустичного контролю методом вільних коливань. Описано інтерфейс і результати роботи програми, що реалізує роботу мережі АРТ-2, а також розроблено засіб для контролю методом вільних коливань. Бібліогр. 10, рис. 2.

Ключові слова: нейронні мережі, композиційні матеріали, класи дефектів, інтерфейс, діагностика

Композиційні матеріали (КМ) знаходять широке застосування в різних галузях промисловості. Композиційний матеріал є неоднорідним суцільним матеріалом, що складається з двох або більше компонентів, серед яких можна виділити армуючі елементи, що забезпечують необхідні механічні характеристики матеріалу, та матрицю, що забезпечує спільну роботу армуючих елементів.

В процесі полімеризації композитів при їх виготовленні через внутрішні напруги, нерівномірний розподіл зв'язуючого та інші технологічні фактори можуть виникати розшарування, відшарування окремих шарів, рихлість, тріщини та ін. Основні типи дефектів, причини виникнення та їх вплив на механічні характеристики виробів з композитів досить докладно описані в роботах [1, 2]. Дефекти КМ знижують експлуатаційну надійність виробів на їх основі, тому важливою задачею є забезпечення своєчасного виявлення різних дефектів КМ методами неруйнівного контролю.

Поширеним методом контролю КМ є метод вільних коливань (МВК), який оснований на аналізі характеристик вільних коливань виробу, що вібрує після удару [3]. МВК використовує згинні коливання звукового діапазону частот (до 20 кГц). Інформативним параметром служить частотний спектр збуджуваних імпульсів. Він є узагальненою характеристикою, що містить всі відомості про амплітуду, форму, тривалість, частотний і фазовий склад коливань.

Варто зазначити, що існуючі системи контролю, що використовують МВК, не дозволяють вирішувати задачу класифікації (кластерного аналізу) в автоматичному режимі, що знижує їх ефективність, а також швидко вносити в пам'ять

системи інформацію про нові класи (об'єкти або дефекти), не дозволяють розширювати власну базу знань без перерахунку всіх параметрів системи розпізнавання.

В останні десятиліття стрімко розвивається нова прикладна область математики, що спеціалізується на штучних нейронних мережах. Актуальність досліджень в цьому напрямку підтверджується безліччю різних практичних застосувань. Це автоматизація процесів розпізнавання образів, адаптивне управління, апроксимація функціоналів, прогнозування, створення експертних систем, організація асоціативної пам'яті і багато інших додатків. У завданнях НК очевидне застосування нейронних мереж – це розпізнавання дефектів за сигналами приладу неруйнівного контролю [4].

В задачах НК навчена нейронна мережа повинна не тільки розпізнавати та класифікувати отримані під час контролю сигнали з датчиків, але і зберігати інформацію про закономірності і взаємозв'язки характеристик інформаційного сигналу і стану об'єкта контролю, а також правильно класифікувати інформаційні сигнали, що відповідають можливим дефектам, які не зустрічались під час навчання.

До нейромережевої архітектури, що може бути застосована для розпізнавання дефектів, пред'являються наступні вимоги:

- можливість роботи з безперервними або квазібезперервними вхідними даними;
- можливість навчання без вчителя, що необхідно для автоматизації формування нових класів дефектів;
- рішення дилеми стабільності–пластичності, що необхідно для запобігання порушення роботи мережі в результаті перенавчання.

Архітектура нейронних мереж адаптивної резонансної теорії. Зазначеним вимогам відповідає архітектура нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ). Мережі й алгоритми АРТ [5, 6] зберігають пластичність, необхідну для вивчення нових класів об'єктів, у той же час запобігаючи зміні раніше запам'ятованих класів; дозволяють виконувати аналіз форми отриманих інформаційних сигналів, тобто без попередньої обробки вхідних даних формувати набір діагностичних ознак, що значно розширює область їх застосування. АРТ-мережі можуть використовуватись для вирішення таких задач НК, як кластерний аналіз, класифікація дефектів об'єктів контролю (ОК), розпізнавання образів тощо.

Теорія мереж АРТ включає декілька парадигм, кожна з яких визначається формою вхідних даних і способом їхньої обробки. АРТ-1 розроблена для обробки бінарних вхідних векторів, а мережі АРТ-2 і Fuzzy-ART можуть класифікувати як бінарні, так і неперервні вектори даних.

Мережі АРТ являють собою векторний класифікатор. Вхідний вектор класифікується в залежності від того, на який із раніше запам'ятованих мережею еталонних образів він схожий. Рішення щодо класифікації вхідного вектору мережа АРТ виражає у формі збудження одного з нейронів шару розпізнавання. Якщо вхідний вектор не відповідає жодному із запам'ятованих образів, створюється нова категорія (виділяється новий нейрон та запам'ятовується новий вектор), яка відповідає вхідному вектору. Якщо визначено, що вхідний вектор схожий на один з раніше запам'ятованих векторів за визначеним критерієм подібності, еталонний вектор в пам'яті нейронної мережі буде

змінюватися (навчатися) під впливом нового вхідного вектора таким чином, щоб стати більш схожим на даний вхідний вектор [7].

Мережа АРТ-2 складається з двох прошарків: 1 – вхідного прошарку порівняння (що має L нейронів), на який подаються образи – набори вхідних даних; 2 – вихідного прошарку розпізнавання (що має P нейронів), який визначає кількість класів – груп образів. Кожен нейрон вхідного прошарку з'єднаний з кожним нейроном вихідного прошарку висхідними синаптичними зв'язками T , а кожен нейрон вихідного прошарку з'єднаний з кожним нейроном вхідного прошарку спадними зв'язками B [8].

Нейронні мережі АРТ-2 і Fuzzy-ART мають наступні переваги: можливість працювати з інформаційними сигналами без попередньої обробки (відбору та формування простору діагностичних ознак), в якості інформаційного параметру може використовуватись форма сигналу, стабільність запам'ятованої інформації та можливість динамічно розширювати власну базу знань; високу роздільну здатність при класифікації даних; добру заводозахищеність; інваріантність відносно порядку пред'явлення вхідних векторів; можливість змінювати швидкість навчання мережі, при повторному пред'явленні навчальної вибірки нейронна мережа здатна сама виправити помилки, допущені на попередньому етапі роботи; можливість працювати з аналоговими сигналами. Також існує можливість навчати АРТ-мережу в процесі контролю, отже зникає необхідність у формуванні великої кількості еталонних зразків первинного налаштування мережі, що дозволяє використовувати її для вирішення широкого кола задач [9].

Реалізація алгоритму класифікації на основі мережі АРТ-2. За результатами аналізу існую-

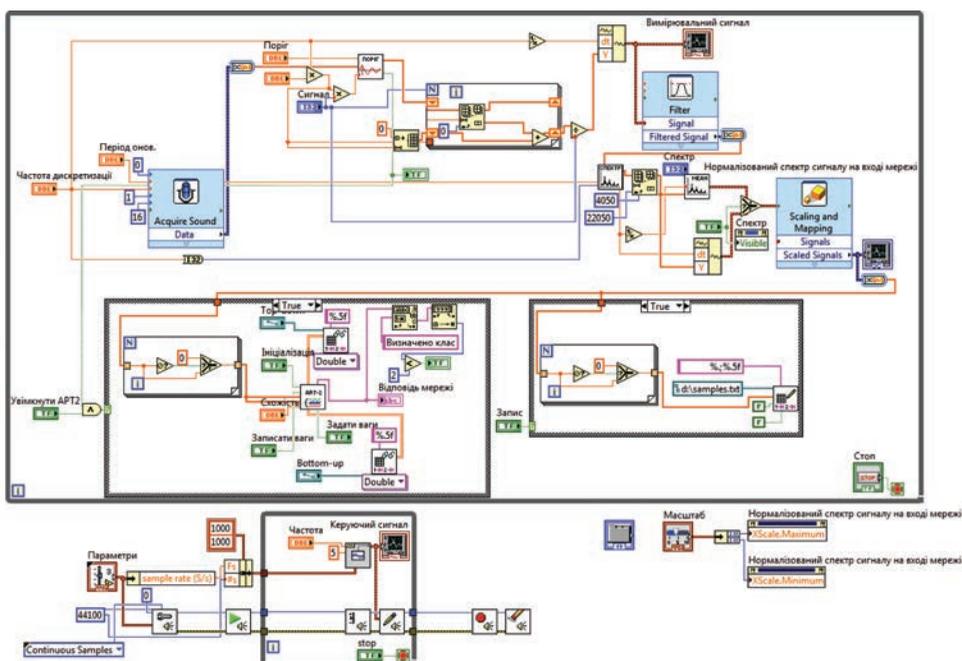


Рис. 1. Блок-діаграма віртуального приладу системи класифікації технічного стану об'єктів з використанням нейронних мереж

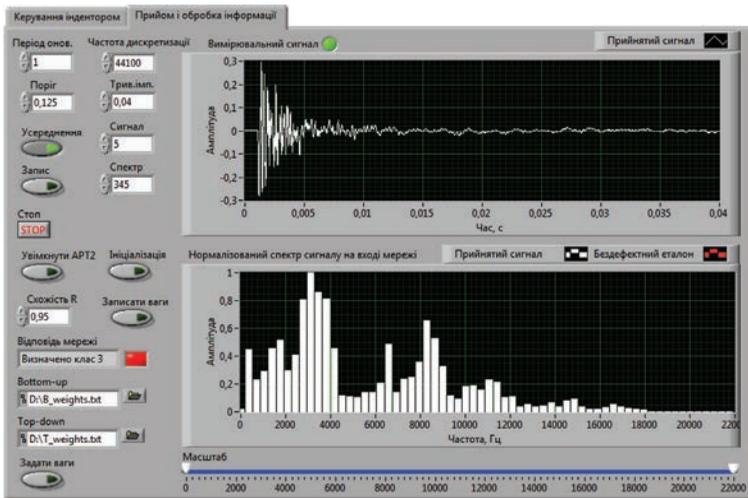


Рис. 2. Інтерфейс віртуального приладу для контролю КМ методом вільних коливань

чих програмних засобів для роботи з нейронними мережами було обрано оптимальні пакети для створення віртуального приладу контролю методом вільних коливань та автоматичної класифікації дефектів. Високий рівень інтеграції мови MATLAB та програми NI LabVIEW дозволив реалізувати модель нейронної мережі АРТ-2 за допомогою саме цих програм (рис. 1). Основні формули та залежності були взяті із робіт [6, 8, 10].

Окрім програмування алгоритму роботи нейромережі був сконструйований перетворювач, який містить в корпусі індентор (на основі соленоїду фірми Sparkfun) та мікрофонний приймач сигналів (електретний мікрофон WM-62A, що має компактні розміри та рівномірну амплітудно-частотну характеристику). Мікрофон підключено до лінійного входу персонального комп'ютера (ноутбука) (ПК), що дозволяє використовувати звукову карту в якості аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та приймати і обробляти дані безпосередньо в LabVIEW. Оцифровування сигналу проходить з частотою дискретизації 44,1 кГц, розрядність АЦП звукової карти 16 біт. Використання сучасних елементів та готових рішень дозволило значно спростити конструкцію перетворювача, знизивши його габаритні розміри та вагу. Керування індентором та прийом сигналів виконується за допомогою звукової карти ПК, що значно підвищує ефективність та універсальність системи. Керування частотою ударів та напругою живлення здійснюється за допомогою інтерфейсу віртуального приладу LabVIEW. У якості формувача керуючих імпульсів використовується цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) звукової карти ПК. Оскільки соленоїд споживає струм силою в 1 А, використовується зовнішнє джерело живлення. Для комутації ударного вібратора між зовнішнім джерелом живлення використовується транзисторний ключ на базі мікросхеми ULN2003,

що представляє собою високовольтний багатоканальний транзисторний ключ, який використовується при високих рівнях струму.

Поєднання сучасних механічних елементів та комп'ютерних технологій дозволило позбутися використання окремих АЦП, ЦАП, фільтрів та інших проміжних блоків, спрощуючи структуру організації системи. Обробка даних за допомогою віртуального приладу, створеного на базі програмного пакету NI LabVIEW, підвищила зручність роботи, позбавляючи необхідності створення складних алгоритмів та допоміжних програм. Використання нейронних мереж дозволило реалізувати автоматичну класифікацію стану об'єкту контролю, підвищило адаптивність системи, зменшило роль оператора при прийнятті рішень, загалом підвищуючи ефективність та надійність системи.

Інтерфейс віртуального приладу розробленої системи зображено на рис. 2. Найявні елементи для керування періодом оновлення або довжиною реалізації (тривалістю вікна). Синхронізація відбувається за пороговим рівнем.

Система була протестована на зразках із різними дефектами. При цьому при появі нових дефектів нейронна мережа створювала нові класи. Це обумовлено тим, що кожен зразок містив дефект певного типу, тобто геометричні розміри дефектних зон відрізнялись для різних зразків. Відповідно, спектри сигналів від кожного окремого дефекту були різними, на що реагувала мережа. Таким чином, була доведена основна перевага АРТ-2, а саме вирішення дилеми пластичності-стабільності: у процесі навчання у пам'ять вносилися інформація про нові класи дефектів, тоді як дані про вже існуючі класи не були змінені чи втрачені.

В результаті експерименту було підтверджено ряд переваг системи класифікації технічного стану об'єктів із використанням нейронних мереж над традиційними системами аналогічного типу. Використання нейромережі АРТ-2 дозволило підвищити адаптивність системи контролю, а також створити можливість автоматичного навчання та додавання у пам'ять класифікатора нової інформації про типи дефектів, що раніше не зустрічалися.

Висновки

Впровадження нейромережових технологій в галузь НК є актуальною задачею, що може вивести саму процедуру прийняття рішень за результатами контролю на новий якісний рівень. Проте говорити щодо значних переваг такого підходу ще зарано, оскільки існуючі нейромережові технології окрім

перевага мають і недоліки, які необхідно вирішувати в кожному окремому випадку.

Застосування алгоритму АРТ-2 до аналізу отриманих в результаті контролю МВК даних виявило його працездатність та потенціальні можливості, але водночас з'ясувалось, що при певних параметрах самої мережі та налаштуваннях засобу вимірювання можлива неконтрольована поява великої кількості нових класів, проте вони ніяк не були пов'язані з наявністю дефектів. В більшості випадків ці класи правильно класифікувались як бездефектні, хоча були і винятки. Проте величезна кількість навіть правильно визначених класів не призводить до полегшення сприйняття результатів контролю дефектоскопістом. Тому дану проблему ще належить вирішити в подальших дослідженнях.

Список літератури

1. Воробей В. В., Маркин В. Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композиционных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.
2. Барынин В. А., Будадин О. Н., Кульков А. А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Спектр, 2013. – 242 с.
3. Клюев В. В., Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. – М: Машиностроение, 2004. – 864 с.
4. Бархатов В. А. Распознавание дефектов с помощью искусственной нейронной сети специального типа // Дефектоскопия. – 2006. – № 2. – С. 28–39.
5. Технології штучних нейронних мереж. – Режим доступу: http://www.victoria.lviv.ua/html/neural_nets/zmist.htm.
6. Laurene V. Fausett Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications. Prentice-Hall, 1994. – 461 p.
7. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
8. Крючин О. В., Зенкова Н. А. Использование искусственных нейронных сетей для решения задач классификации на примере моделирования медицинского объекта // Вестник ТГУ. – 2011. – № 3. – С. 48–51.
9. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. – М.: ДМК, 2005. – 304 с.
10. Carpenter G. A., Grossberg S. ART 2: self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns. – Applied Optics. – 1987. – 26. – P. 4919–4930.

References

1. Vorobey V. V., Markin V. B. Kontrol kachestva izgotovleniya i tekhnologiya remonta kompozitnykh konstruktsiy. – Novosibirsk: Nauka, 2006. – 190 s. [in Russian].
2. Barynin V. A., Budadin O. N., Kulkov A. A. Sovremennye tekhnologii nerazrushayushchego kontrolya konstruktsiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. – M.: Spektr, 2013. – 242 s. [in Russian].
3. Klyuyev V. V., Yermolov I. N., Lange Yu. V. Nerazrushayushchy kontrol. Spravochnik v 7 t. – M: Mashinostroyeniye, 2004. – 864 s. [in Russian].
4. Barkhatov V. A. Recognizing Imperfections with an Artificial Neural Network of a Special Type // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2006. – #2. – P. 92–100

5. Tekhnologii shtuchnikh neironnikh merezh: http://www.victoria.lviv.ua/html/neural_nets/zmist.htm.
6. Laurene V. Fausett Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications. Prentice-Hall, 1994. – 461 p.
7. Barsky A. B. Neyronnye seti: raspoznavaniye, upravleniye, prinyatiye resheny. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 176 s. [in Russian].
8. Kryuchin O. V., Zenkova N. A. Ispolzovaniye iskusstvennykh neyronnykh setey dlya resheniya zadach klassifikatsii na primere modelirovaniya meditsinskogo obyektu // Vestnik TGU. – 2011. – № 3. – S. 48–51. [in Russian].
9. Smolentsev N. K. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v Matlab. – M.: DMK, 2005. – 304 s. [in Russian].
10. Carpenter G. A., Grossberg S. ART 2: self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns. – Applied Optics. – 1987. – 26. – P. 4919–4930.

Р. М. ГАЛАГАН, А. С. МОМОТ

НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского».

03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: rgalagan@ukr.net

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Рассмотрена возможность применения архитектуры нейронной сети АРТ-2 для разработки алгоритмов классификации технического состояния композиционных материалов по результатам акустического контроля методом свободных колебаний. Описаны интерфейс и результаты работы программы, реализующей работу сети АРТ-2, а также разработано средство для контроля методом свободных колебаний. Библиогр. 10, рис. 2.

Ключевые слова: нейронные сети, композиционные материалы, классы дефектов, интерфейс, диагностика

R. M. GALAGAN, A. S. MOMOT

NTUU Igor Sykorsky Kiev Polytechnic Institute». 37, Peremohy Prosp. E-mail: rgalagan@ukr.net

REALIZATION OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR CLASSIFICATION OF TECHNICAL STATE OF COMPOSITE MATERIAL BY ACOUSTIC TESTING RESULTS

Possibility of application of APT-2 neural network architecture for development of algorithms for classification of technical condition of composite materials by the results of acoustic testing by free oscillations method, is considered. Interface and results of operation of a program that implements the APT-2 network are described, and a device for testing by free oscillations method was developed. 10 References, 2 Figures.

Keywords: neural networks, composite materials, defect classes, interface, diagnostics

*Надійшла до редакції
20.01.2017*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МОНТАЖНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕГЕНЕРАТОРА УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УЗ-ОБСЛЕДОВАНИЯ

Е. А. ДАВЫДОВ, В. П. ДЯДИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: davydov@paton.kiev.ua

Рассмотрен пример достаточно сложного и объемного диагностического обследования регенератора установки каталитического крекинга. Показаны основные особенности, на которые следует обращать внимание при проведении обследования. Изложен прием адаптации метода TOFD для обследования и оценки поврежденного нефтехимического оборудования. Библиогр. 22, рис. 4.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, диагностическое обследование, метод TOFD

Рассмотрен случай УЗ контроля при проведении диагностического обследования регенератора установки каталитического крекинга. Конечной целью обследования регенератора являлось определение возможности ремонтно-восстановительных работ поврежденных участков (сварных соединений).

Для решения этой задачи на начальном этапе обследования были проведены стандартные исследования, которые включали:

- анализ технической документации и результатов предыдущих диагностических обследований;

- визуальный контроль поврежденных мест регенератора и определение мест возможных вырезов поврежденного металла для дальнейших лабораторных исследований.

Результаты этих исследований представлены в работе [1], где отмечается, что экономическая целесообразность проведения ремонтно-восстановительных работ зависит от степени поврежденности сварных швов и основного металла, находящегося вне зоны сварных соединений.

Учитывая, что внутренний осмотр аппарата был невозможен, возник вопрос о выборе оптимального метода неразрушающего контроля, который позволил бы оценить степень поврежденности сварных соединений и прилегающим к ним участкам основного металла.

Выбор оптимального метода проведения НК.

Для выявления внутренних несплошностей используются объемные методы НК. В практике обследования сосудов и металлических конструкций их всего два – рентген (проникающие излучения) и ультразвук. В ряде случаев можно использовать электромагнитные методы, с помощью которых выявляются подповерхностные не-

сплошности. Применение, например, магнитопорошкового метода весьма эффективно не только по затратам времени, средств, но и информативно, так как индикации очень хорошо коррелируются с реальными геометрическими характеристиками несплошностей. Правда, использование этих методов возможно, если несплошности располагаются достаточно близко от поверхности контроля, обычно для результатов с хорошей достоверностью дефекты должны быть не глубже 1...3 мм от поверхности. Учитывая, что толщина обечаек в верхней части корпуса составляет 20...22 мм использование данного подхода не позволяло надеяться на выявление несплошностей и качественную оценку границ поврежденности сварного соединения.

Применение рентгеновского метода контроля было исключено по причине наличия торкрет-бетона на внутренней поверхности и большей частью отсутствием доступа к внутренней поверхности. Кроме этого, рентген не очень хорошо выявляет трещиноподобные несплошности. Для надежного выявления нужно правильно ориентировать направление излучения по отношению к трещине. Оценка размеров трещин в направлении толщины стенки в этом случае также очень затруднительна. Таким образом, арсенал методов контроля сузился до возможностей УЗК.

В настоящее время возможности УЗК достаточно обширны даже для штатного применения. Целый ряд европейских стандартов уже принят в Украине как ДСТУ [2–19]. В целом, использование и выбор стандартов является добровольным и во многом может определяться ответственностью, опытом и компетентностью исполнителя.

С одной стороны, наличие достаточно широких документированных (подтвержденных)

возможностей позволяет определять различные количественные и качественные параметры несплошностей. С другой, использование всего арсенала возможностей связано с большими затратами, кроме того, избыточная информация просто становится невостребованной. Поэтому для эффективного контроля необходимо выбрать оптимальные схемные решения, провести их адаптацию и проверку.

Выявление и анализ несплошностей оборудования, которое отработало свой расчетный ресурс, практически невозможно выполнять только в рамках существующих отраслевых инструкций. Обычно отечественные НТД не предусматривают возможность адаптации схемных решений под конкретные ситуации. В инструкциях достаточно жестко регламентированы схемы контроля и параметры пьезоэлектрического преобразователя

(ПЭП). Изменение угла ввода уже рассматривается как серьезное отступление от требования норматива. Некоторые нормативы декларируют возможность адаптации схемных решений к задачам контроля, но размытость положений, почти всегда их двусмысленность, отсутствие такой практики сводит все на нет. Формальный подход, конечно, всегда будет проигрывать конкретно продуманным схемным решениям. В частности, ранее неоднократно выполненный УЗК (в соответствии с требованиями НТД) не выявил ни одной несплошности ни в сварных соединениях, ни в околошовных зонах. Причем контроль выполнялся сертифицированными специалистами в строгом соответствии с положениями НТД. Следует при этом отметить, что факт наличия трещин в металле реактора был известен, не были установлены места, в которых эти трещины присутствуют, характер трещин и пр.

Объект контроля и основные его геометрические характеристики приведены на рис. 1. Понятно, что даже выборочный (первоначальный) контроль должен быть значительным по объему.

Для выявления и оценки несплошностей были предложены следующие подходы:

1) приемы стандартного эхо-метода для относительно быстрого выявления трещин и их примерной локализации.

2) для количественной оценки высоты трещин использование метода TOFD.

Учитывая, что трещины образуют угловой отражатель с поверхностью объекта, эта особенность упрощает и определяет параметры контроля: угол ввода 40 или 50°, частота 2,5 МГц. Для большей разрешающей способности полезно дополнительно использовать преобразователи с более высокой частотой, например 5 МГц. Особенностью использования эхо-метода в нашем случае является неопределенность положения трещин, поэтому для достоверного выявления необходимо осуществлять дополнительно угловое сканирование. При этом диапазон углового сканирования можно сузить, если учесть, что основная масса трещин образуется по механизму межзеренного коррозионного растрескивания под напряжением на внутренней поверхности и, следовательно, их преимущественное расположение будет поперек сварного соединения (для кольцевых сварных соединений). Во время проведения обследования полезно подстраиваться под изменяющиеся условия (плотность несплошностей, зона сканирования, шероховатость поверхности и пр.).

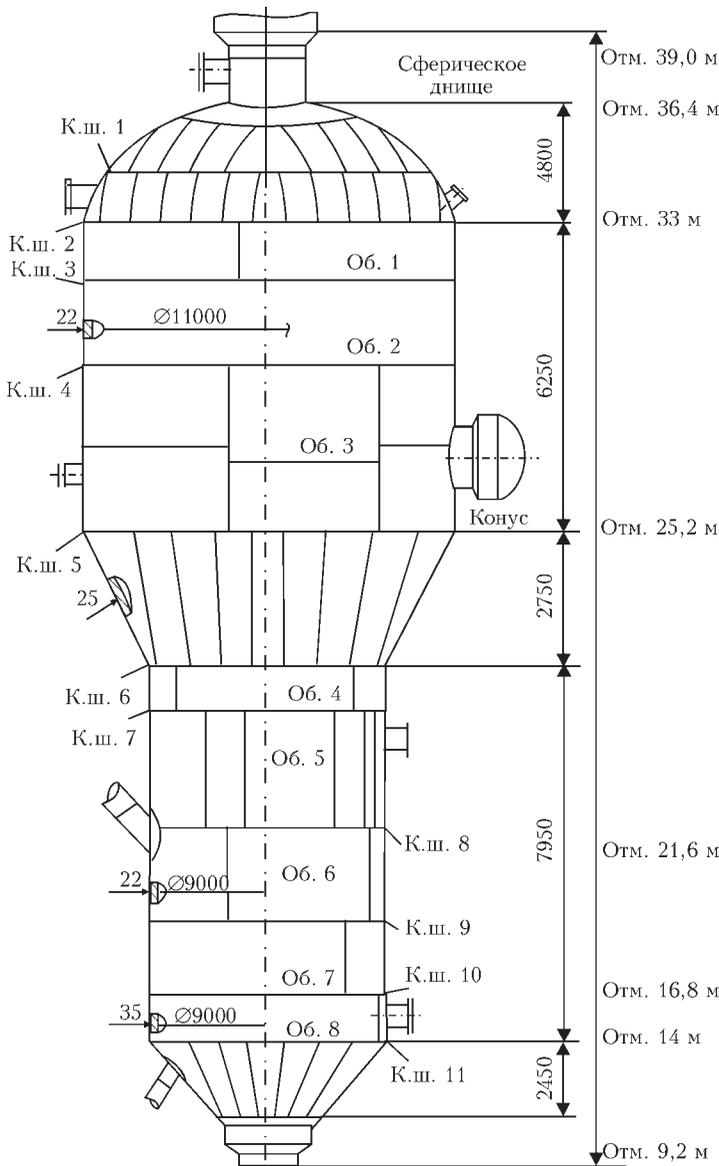


Рис. 1. Общий вид объекта контроля с обозначениями сварных швов (кольцевые швы К.ш.1–К.ш.7) и элементов аппарата (обечайки Об.1–Об.8)

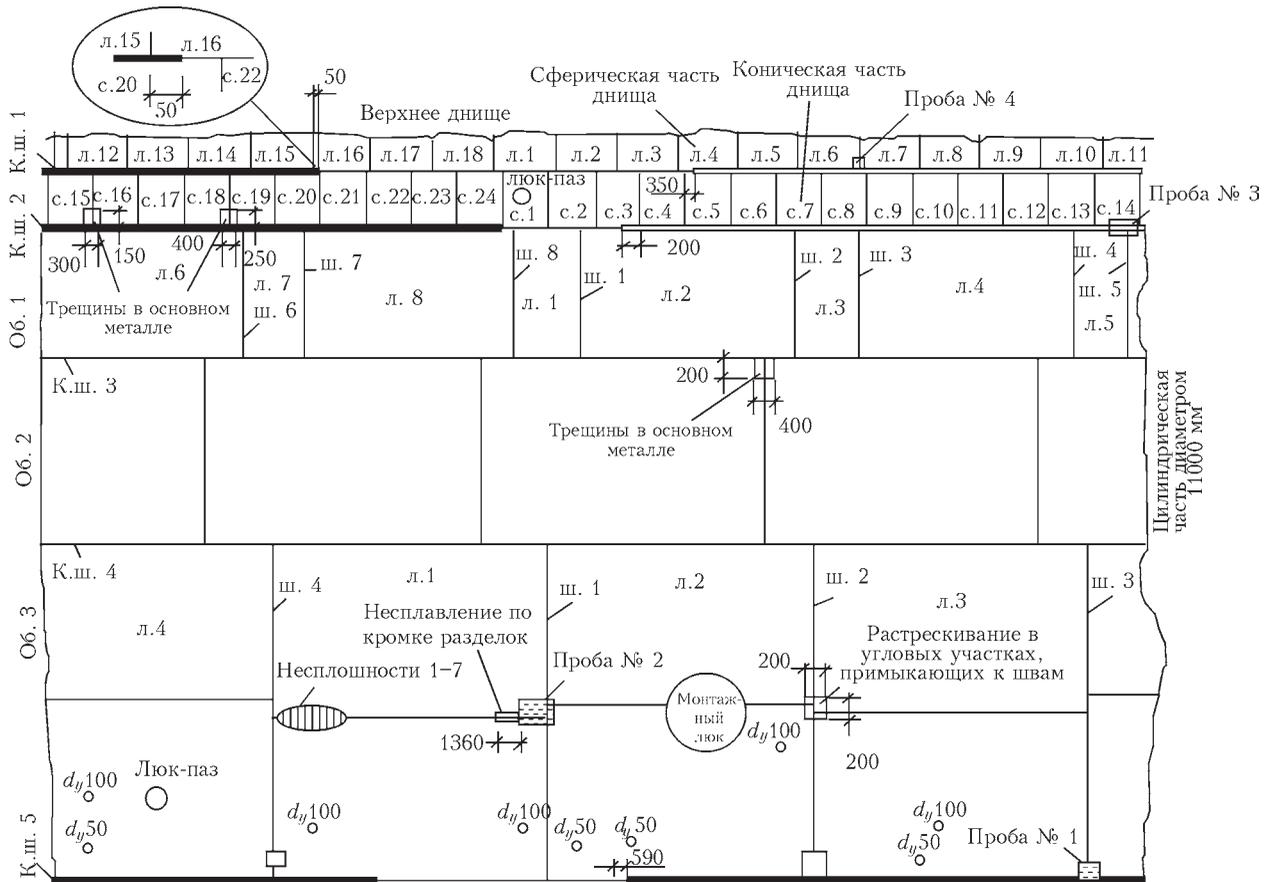


Рис. 2. Пример фрагмента корпуса регенератора с выявленными трещиноподобными несплошностями: выделенные участки кольцевых швов имеют плотность несплошностей 30...50 несплошность/метр (л.1–л.8 – листы; с.1–с.24 – сегменты; ш.1–ш.4 – швы)

Для выявления несплошностей и их примерного расположения возможностей эхо-метода вполне достаточно. Например, протяженность несплошности эхо-методом может быть выполнена с приемлемой погрешностью, причем, чем больше протяженность, тем выше относительная точность оценки. Для оценки несплошностей можно пользоваться рекомендациями [13, 14]. Принципиальной сложностью эхо-метода является невозможность измерения высоты несплошностей, что в данном случае является крайне важным параметром. Высота трещины определяет ее критический размер, а значит однозначное решение о необходимости ремонта данного участка.

В результате выполненного УЗ контроля (по пункту 1 – стандартный эхо-метод) было обнаружено:

- отсутствие расслоения основного металла регенератора;
- наличие системных трещиноподобных несплошностей в кольцевых сварных швах К.ш. 1, К.ш. 2, К.ш.5 (см. рис. 1), плотность трещин на некоторых участках швов превышала 20...30 несплошностей на метр, на остальных участках также обнаружены трещиноподобные несплошности, но не столь высокой плотности. Наибольшие размеры трещиноподобных несплошностей были

оценены величиной 100...120 мм от кольцевого шва в сторону основного металла. К.ш.5 имеет преимущественное растрескивание сварного шва в направлении об. № 3 на расстояние не более 100 мм, в основном, не более 50 мм. Развитие трещин в направлении конусной части незначительное и составляет около 20...35 мм;

- в сварных соединениях К.ш. 3, К.ш. 4 (см. рис. 1) выявлены многочисленные трещиноподобные несплошности. Несплошности развиваются с внутренней стороны. Протяженность наибольших несплошностей составляет около 50...60 мм в каждую сторону от шва;
- при выборочном контроле не обнаружено трещиноподобных несплошностей в нижней цилиндрической части регенератора К.ш 6...11 (см. рис. 1).

По результатам контроля (рис. 2) можно понять, что консервативный подход, предусматривающий ремонт любых обнаруженных трещин, является крайне затратным и экономически нецелесообразным. Как уже было сказано, наличие трещин не является однозначным следствием необходимости ее ремонта или прекращения эксплуатации регенератора. Решение принимается исходя из геометрических характеристик обнаруженных трещин и основной характеристикой яв-

ляется их высота. Разумеется, что кроме геометрических размеров трещин для оценки надежной эксплуатации принимается во внимание целый ряд других параметров объекта (конструктивные особенности, механические свойства металла, наличие остаточных напряжений и пр.).

Измерение высоты трещин на основе ДСТУ [15–19] обеспечивает погрешность на уровне 1...2 мм, а для относительных измерений эта погрешность может быть уменьшена. Использование указанных стандартов возможно только при наличии оборудования с позиционированием положения ПЭП, накоплением результатов сканирования и последующей программной обработкой. Однако интерпретация полученных данных требует некоторых усилий и времени, что вполне приемлемо для небольшого числа несплошностей, но для значительного количества может быть проблемой. В нашем случае из-за большого объема контроля и значительного количества трещин вопрос о скорости проведения контроля оказался принципиальным. Для решения указанной проблемы был предложен механизм обработки и визуализации данных сканирования, который позволил проводить контроль в несколько раз быстрее не прибегая к детальному анализу формирования изображения и не требующий от оператора глубокого понимания процесса образования волн дифракции.

Дифрагированный сигнал по своей природе имеет достаточно низкие энергетические характеристики по сравнению с первичным УЗ сигналом (за некоторым исключением). Эта особенность затрудняет или даже не позволяет выделять сигналы волн дифракции пороговым способом, как это традиционно принято в эхо-методе.

Для повышения достоверности контроля предложен механизм выделения сигналов, дифрагированных на крае трещины. Возможность выделения дифрагированных волн (собственно, вершин трещин) основывается на зависимости амплитудно-пространственных (временных) характеристик, а именно, на зависимости амплитуды сигнала волны, дифрагированной на вершине трещины, от положения сканирующей системы преобразователей. Другими словами, одновременный анализ кинематических и амплитудных характеристик дифракционных волн дает возможность выделить именно эти волны среди иных сигналов, имеющих другие кинематические и динамические свойства.

Схема типового метода TOFD представлена на рис. 3. Первый преобразователь излучает УЗ волну, а второй принимает. Расстояние между преобразователями постоянно и не меняется в процессе сканирования.

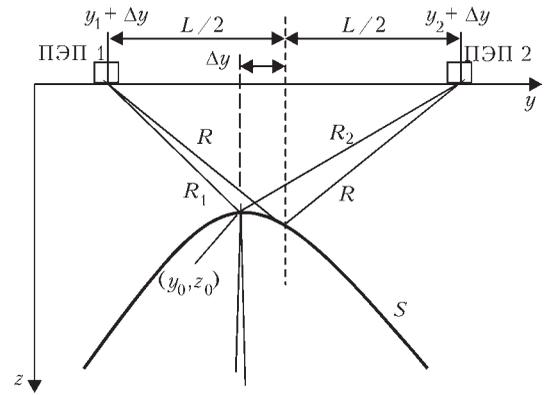


Рис. 3. Схема контроля по методу TOFD: S – расчетный «след» вершины трещины с координатами (y_0, z_0) ; R_1, R_2 – расстояния от вершины трещины до соответствующего ПЭП; Δy – величина смещения средней точки между ПЭП от вершины трещины (y_0); $R = (R_1 + R_2)/2$

Предположим, что вершина трещины имеет координаты (z_0, y_0) . При смещении системы преобразователей на Δy мы получим расчетные значения координат вершины трещины (y', z') , которые будут располагаться на определенной кривой $S(y_0, z_0)$. В этом случае $S(y_0, z_0)$ будет определяться следующим параметрическим выражением:

$$S_{(y_0, z_0)} = \begin{cases} z' = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{(y_1 - \Delta y)^2 + z_0^2} + \sqrt{(y_2 + \Delta y)^2 + z_0^2}}{2} \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2}, \\ y' = y_1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{2} \right) + \Delta y = y_0 + \Delta y, \end{cases} \quad (1)$$

где y_1 и y_2 – первоначальные положения излучающего и приемного преобразователя; L – расстояние между преобразователями согласно схеме контроля, приведенной на рис. 3.

В общем случае, согласно обозначениям на рис. 3, амплитудную зависимость на ПЭП2 от положения преобразователей можно представить количественно:

$$A_{\text{ПЭП 2}} \left(t + \frac{R_1 + R_2}{C_L}, y' \right) = F_{y_0, z_0}(y') A_{\text{ПЭП 1}}(t, y'),$$

где $A_{\text{ПЭП 1}}, A_{\text{ПЭП 2}}$ – сигналы излучающего преобразователя ПЭП 1 и приемного ПЭП 2 или $F_{y_0, z_0}(y') = A_{\text{ПЭП 2}}/A_{\text{ПЭП 1}}$.

В дальнейшем обозначим $\frac{R_1 + R_2}{C_L} = f(y')$.

Для любой точки пространства (y, z) , в которой может находиться вершина трещины, $F_{y_0, z_0}(y')$ определяет амплитудную зависимость для ПЭП, включенных по раздельной схеме (см. рис. 3). Изменение амплитуды дифрагированного сигнала на рассматриваемой кривой $S(y_0, z_0)$ носит вполне определенный закономерный характер, который определяется природой образования волн дифракции и особенностями акустических полей преобразователей:

$$F_{y_0, z_0}(y') = \Phi_1(y', y_0, z_0) \Phi_2(y', y_0, z_0) W(y', y_0, z_0). \quad (2)$$

Здесь $\Phi_1(y', y_0, z_0)$, $\Phi_2(y', y_0, z_0)$ – определяет диаграмму направленности преобразователей ПЭП 1 и ПЭП 2 соответственно; $W(y', y_0, z_0)$ – определяет зависимость амплитуды дифрагированной волны, образованной на вершине трещины.

Для инженерных приложений можно использовать простую эмпирическую зависимость диаграммы направленности вблизи акустической оси, предложенную в работе [21]:

$$\Phi(\varphi) = \cos\left(\frac{\pi}{5\varphi_0} \varphi\right),$$

где φ – угол отклонения от акустической оси; φ_0 – раскрытие основного лепестка на уровне 0,8.

Для более точных количественных оценок и численного анализа можно применить выражение, полученное в работе [22]:

$$\Phi(\theta) = \frac{\sin\left[Ka_2(\sin\gamma - \sin\theta)\cos^{-1}\beta\right]}{Ka_2(\sin\gamma - \sin\theta)\cos^{-1}\beta},$$

где θ – угол наблюдения, отсчитываемый от нормали к границе раздела в плоскости падения; K – волновое число для данного типа волны; a_2 – радиус пьезопластины преобразователя; γ и β – углы преломления и падения ультразвуковой волны на границу раздела призма-объект

контроля ($\beta = \arcsin\left(\frac{C_{LIII}}{C_{LCC}} \sin\gamma\right)$; C_{LIII} – скорость продольной волны в призме; C_{LCC} – скорость продольной волны в среде объекта контроля).

Количественную зависимость дифрагированных волн можно определить, например, следующим образом [20]:

$$u_{\text{диф}} = \pm uW\left(\vartheta\sqrt{\frac{kr}{\pi}}\right)e^{i(\omega t - kr)},$$

где u – амплитуда сигнала на дифрагирующей границе трещины; k – волновое число; ω – круговая частота; t – время; ϑ, r – цилиндрические координаты рассматриваемой точки относительно вершины трещины, угол ϑ – отсчитывается от направления падения первичной волны (знак «+» берется, когда точка наблюдения расположена в зоне тени, и «-» в освещенной области).

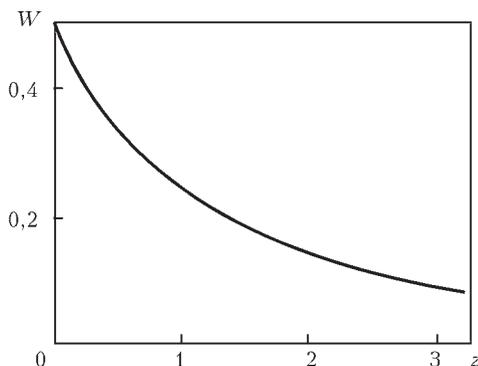


Рис. 4. График модуля функции $W(z)$

Функция $W(z)$ является комплексной и выражается через вырожденную гипергеометрическую функцию:

$$W(z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \Psi\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{i\pi z^2}{2}\right).$$

График модуля функции $W(z)$ показан на рис. 4.

В зоне глубокой тени зависимость амплитуды дифрагированной волны имеет асимптотическое представление:

$$W(z) = \pm \frac{1}{\sqrt{2\pi kr} |\vartheta|} e^{i(\omega t - kr - \frac{\pi}{4})}.$$

Указанную зависимость $F_{y_0, z_0}(y')$ можно получить экспериментально на тестовых образцах, что для небольших диапазонов толщин относительно несложно выполнить, а с точки зрения практических работ дает всегда более точные результаты. В данном случае зависимость $F_{y_0, z_0}(y')$ определялась на фрагментах вырезки из корпуса регенератора, которые содержали трещины различной глубины (см. рис. 2).

Уравнение предполагаемой вершины трещины (y_0, z_0) , которая может находиться в любой точке сканируемого пространства $\{y, z\}$, преобразуем следующим образом:

$$A_{y_0, z_0}(t) = \int_{S_{y_0, z_0}} \left(F_{y_0, z_0}(y')\right)^{-1} A_{\text{ПЭП2}}(t - f(y'), y') dS_{y_0, z_0}. \quad (3)$$

Если вершина трещины действительно совпадает с координатами (y_0, z_0) , то функция $A_{y_0, z_0}(t)$ практически представляет излучаемый импульс преобразователем ПЭП 1 – $A_{\text{ПЭП1}}(t)$. Некоторое различие между импульсами $A_{\text{ПЭП1}}(t)$ и $A_{y_0, z_0}(t)$ будет из-за неучтенного затухания акустических волн в материале объекта контроля. В принципе эти различия нетрудно устранить введением соответствующих корректирующих поправок, но в данном случае зависимость (2) определялась экспериментально на натуральных образцах, поэтому учет реального затухания входит в зависимость (2) в неявном виде.

Дифрагированная волна в области тени часто соизмерима с шумами в канале приема сигналов ПЭП2, поэтому выражение (3) позволяет сформировать приемлемый по амплитуде сигнал от вершины трещины или, проще говоря, выявить трещиноподобную несплошность. Таким образом, наличие сигнала $A_{y_0, z_0}(t)$, совпадающего по форме с сигналом, возбуждаемым преобразователем ПЭП 1, уже является подтверждением наличия несплошности в металле. Однако не всегда наличие сигнала означает, что в металле именно трещина. Компактные несплошности (обычно это небольшие включения в металле) формируют очень похожий сигнал по кинематическим характеристикам, поэтому, чтобы отличить компактную

несплошность от трещины необходимо выполнять анализ фаз сигналов, провести дополнительные сканирования и пр. Такой подход является правильным, позволяет весьма достоверно определить тип несплошности, дополнительные характеристики, но занимает много времени. Здесь такой подход был неприемлем из-за больших затрат времени и невысокой производительности. Задачей являлся экспресс-контроль, в первую очередь, оценки высоты наиболее развитых трещин. Поэтому для отграничения трещиноподобных несплошностей от иных несплошностей использовались особенности их динамических характеристик, характерные только для трещин. С этой целью была использована количественная оценка:

$$I_{y_0, z_0}(t) = \int_0^t \int_{S_{y_0, z_0}} \left(F_{y_0, z_0}(y_0) A_{\text{ПЭП } 2}(t - f(y_0), y_0) - F_{y_0, z_0}(y') A_{\text{ПЭП } 2}(t - f(y'), y') \right)^2 dS_{y_0, z_0} dt.$$

По крайней мере, для времени t , не превышающего длительности импульса излучающего преобразователя τ , значение $I_{y_0, z_0}(\tau)$ для трещин должно быть близко к нулю, а для несплошностей, которые отличаются от трещиноподобных, значение $I_{y_0, z_0}(\tau)$, будет существенно отличаться от нулевого. Разумеется, эту оценку следует выполнять только для точек, в которых сформированы адекватные сигналы $A_{y_0, z_0}(t)$, например, удовлетворяющие критерию:

$$\int_0^{\tau} (A_{y_0, z_0}(t))^2 dt \geq J_{y_0, z_0}, \quad (4)$$

где J_{y_0, z_0} – четверть величины $\int_0^{\tau} (A_{y_0, z_0}(t))^2 dt$, полученной во время настройки на тестовых образцах.

Значение $F_{y_0, z_0}(y_0) A_{\text{ПЭП } 2}(t - f(y_0), y_0)$ также можно получить во время настройки.

Последовательно выполнив указанную процедуру ко всем точкам пространства (y, z) , отвечающих соотношению (4), вычисляем количественную характеристику каждой точки $I_{y, z}$:

$$[y, z] \Rightarrow I_{y, z} = \int_0^{\tau} (A_{y, z}(t))^2 dt.$$

Визуализируя $I_{y, z}$ или $1/I_{y, z}$, что более наглядно, получаем преобразованное изображение результатов сканирования. Максимальные значения $1/I_{y, z}$ соответствуют положениям вершин трещин. В общем, картина визуализация будет зависеть от уровня отображения. Конкретное значение уровня отображения устанавливается в процессе проведения калибровки и тестовых испытаний. Обычно это значение превышает сигналы, которые отра-

жаются от границ трещин зеркально или диффузно. Вся процедура оценки высоты трещин можно выполнять автоматически, без участия оператора. Поэтому задача специалиста сводится только к сканированию (сбору данных), оценке участка контроля по максимальной высоте трещин и его привязке к общей системе координат регенератора. Данный подход позволил относительно быстро определить участки регенератора, на которых необходимы ремонтно-восстановительные работы.

Выводы

Предложен способ обработки данных, который позволяет достаточно быстро оценивать степень опасности трещиноподобных несплошностей. Способ основан на совместном анализе кинематических и динамических характеристик волн, дифрагированных на несплошностях. В ряде случаев рассмотренные подходы к диагностике оборудования, имеющего обширные участки повреждений, могут быть весьма полезны.

В целом диагностика сложного оборудования обычно не является линейной задачей, которая бы базировалась на нескольких общепринятых технологических приемах, например, документированных методах НК и прочностных расчетах. Достаточно часто необходима существенная адаптация этих методов к особенностям объекта контроля.

Список литературы

1. Позняков В. Д., Дядин В. П., Давыдов Е. А. Диагностическое обследование поврежденного регенератора установки каталитического крекинга с целью определения необходимых ремонтно-восстановительных работ для безопасной эксплуатации // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2016. – № 1. – С. 45–49.
2. ДСТУ EN 12668-1:2015. Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 1. Прилади.
3. ДСТУ EN 12668-2:2015. Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2. Перетворювачі.
4. ДСТУ EN 12668-3:2015. Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 3. Комбіноване обладнання.
5. ДСТУ ISO 10375:2015. Контроль неруйнівний. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик перетворювача й акустичного поля.
6. ДСТУ EN ISO 11666:2014. Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Рівні приймання.
7. ДСТУ EN ISO 16810:2016. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Загальні вимоги.
8. ДСТУ EN ISO 16811:2015. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Налаштування чутливості і діапазону розгортки.
9. ДСТУ EN ISO 17640:2014. Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Способи, рівні контролю і оцінювання.
10. ДСТУ EN 10160:2015. Контроль ультразвуковий сталевих виробів плоскої форми завтовшки 6 мм або більше (метод відбиття).
11. ДСТУ EN ISO 16826:2015. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Виявлення несущальностей перпендикулярних до поверхні.
12. ДСТУ EN 583-4:2007. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Частина 4. Контролювання несущальностей, перпендикулярних до поверхні.

13. DSTU EN ISO 16827:2015. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик і розмірів несущільностей.
14. DSTU EN ISO 23279:2014. Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Характеристика індикацій у зварних швах.
15. DSTU EN ISO 10863:2014. Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD).
16. DSTU EN ISO 15626:2014. Неруйнівний контроль зварних швів. Дифракційно-часовий метод (TOFD). Рівні приймання.
17. DSTU EN ISO 16828:2015. Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Дифракційно-часовий метод для виявлення та визначення розмірів несущільностей.
18. DSTU ENV 583-6:2005. Неруйнівний контроль. Контроль ультразвуковий. Частина 6. Дифракційно-часовий метод для виявлення і визначення розмірів несущільностей.
19. DSTU CEN/TS 14751:2008. Зварювання. Використання дифракційно-часового методу (TOFD) для контролю зварних швів.
20. Сейсморазведка. Справочник геофизика; под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – 464 с.
21. Гурвич А. К. Диаграмма направленности наклонных искателей // Дефектоскопия. – 1966. – № 6. – С. 3–9.
22. Гребенник В. С., Тайц М. З. Расчет направленности призматического искателя // Дефектоскопия. – 1981. – № 1. – С. 87–101.
23. DSTU EN ISO 23279:2014. Neruynivny kontrol zvarnikh shviv. Ultrazvukovy kontrol. Kharakteristika indykatsiy u zvarnikh shvakh. [in Ukrainian].
24. DSTU EN ISO 10863:2014. Neruynivny kontrol zvarnikh shviv. Ultrazvukovy kontrol. Zastosuvannya difraktsiyno-chasovogo metodu (TOFD). [in Ukrainian].
25. DSTU EN ISO 15626:2014. Neruynivny kontrol zvarnikh shviv. Difraktsiyno-chasovy metod (TOFD). Rivni prymannya. [in Ukrainian].
26. DSTU EN ISO 16828:2015. Neruynivny kontrol. Ultrazvukovy kontrol. Difraktsiyno-chasovy metod dlya viyavlennya ta viznachennya rozmiriv nesutsilnostey. [in Ukrainian].
27. DSTU ENV 583-6:2005. Neruynivny kontrol. Kontrol ultrazvukovy. Chastina 6. Difraktsiyno-chasovy metod dlya viyavlennya i viznachennya rozmiriv nesutsilnostey. [in Ukrainian].
28. DSTU CEN/TS 14751:2008. Zvaryuvannya. Viktorystannya difraktsiyno-chasovogo metodu (TOFD) dlya kontrolyu zvarnikh shviv. [in Ukrainian].
29. Seysmorazvedka. Spravochnik geofizika; pod red. I. I. Gurvicha, V. P. Nomokonova. – M.: Nedra, 1981. – 464 s. [in Russian].
30. Gurvich A. K. Diagramma napravlenosti naklonnykh iskateley // Defektoskopiya. – 1966. – № 6. – S. 3–9. [in Russian].
31. Grebennik V. S., Tayts M. Z. Raschet napravlenosti prizmaticheskogo iskatelya // Defektoskopiya. – 1981. – № 1. – S. 87–101. [in Russian].

References

1. Pozdnyakov V.D., Dyadin V.P., Davydov E.A. Diagnostic examination of damaged regenerator of catalytic cracking unit, in order to determine the repair-reconditioning operations required for operating safety // Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol. – 2016. – №1. – P. 45–49. [in Russian].
2. DSTU EN 12668-1:2015. Neruynivny kontrol. Kharakteristika i verifikatsiya obladnannya dlya ultrazvukovogo kontrolyu. Chastina 1. Priladi. [in Ukrainian].
3. DSTU EN 12668-2:2015. Neruynivny kontrol. Kharakteristika i verifikatsiya obladnannya dlya ultrazvukovogo kontrolyu. Chastina 2. Peretvoryuvachi. [in Ukrainian].
4. DSTU EN 12668-3:2015. Neruynivny kontrol. Kharakteristika i verifikatsiya obladnannya dlya ultrazvukovogo kontrolyu. Chastina 3. Kombinovane obladnannya. [in Ukrainian].
5. DSTU ISO 10375:2015. Kontrol neruynivny. Ultrazvukovy kontrol. Viznachennya kharakteristik peretvoryuvacha u akustichnogo polya. [in Ukrainian].
6. DSTU EN ISO 11666:2014. Neruynivny kontrol zvarnikh shviv. Ultrazvukovy kontrol. Rivni prymannya. [in Ukrainian].
7. DSTU EN ISO 16810:2016. Neruynivny kontrol. Ultrazvukovy kontrol. Zagalni vimogi. [in Ukrainian].
8. DSTU EN ISO 16811:2015. Neruynivny kontrol. Ultrazvukovy kontrol. Nalashtuvannya chutlivosti i diapazonu rozgortki. [in Ukrainian].
9. DSTU EN ISO 17640:2014. Neruynivny kontrol zvarnikh shviv. Ultrazvukovy kontrol. Sposobi, rivni kontrolyu i otsinyuvannya. [in Ukrainian].
10. DSTU EN 10160:2015. Kontrol ultrazvukovy stalevikh virobiv ploskoyi formi zavtovshki 6 mm abo bilshe (metod vidbittya). [in Ukrainian].
11. DSTU EN ISO 16826:2015. Neruynivny kontrol. Ultrazvukovy kontrol. Viyavlennya nesutsilnostey perpendikulyarnikh do poverkhni. [in Ukrainian].
12. DSTU EN 583-4:2007. Neruynivny kontrol. Ultrazvukovy kontrol. Chastina 4. Kontrolyuvannya nesutsilnostey, perpendikulyarnikh do poverkhni. [in Ukrainian].
13. DSTU EN ISO 16827:2015. Neruynivny kontrol. Ultrazvukovy kontrol. Viznachennya kharakteristik i rozmiriv nesutsilnostey. [in Ukrainian].

С. О. ДАВИДОВ, В. П. ДЯДИН

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: davydov@paton.kiev.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦЬ ПОШКОДЖЕННЯ МОНТАЖНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РЕГЕНЕРАТОРА УСТАНОВКИ КАТАЛІТИЧНОГО КРЕКІНГА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ УЗ ОБСТЕЖЕННЯ

Розглянуто приклад досить складного і об'ємного діагностичного обстеження. Показано основні особливості, на які слід звертати увагу при проведенні обстеження. Викладено прийом адаптації методу TOFD для обстеження та оцінки пошкодженого нафтохімічного обладнання. Бібліогр. 22, рис. 4.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, діагностичне обстеження, метод TOFD

Ye. A. DAVYDOV, V. P. DYADIN

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11 Kazimir Malevych str., 03680, Kiev.
E-mail: davydov@paton.kiev.ua

DEFINING BOUNDARIES USHKODZHENNOSTI ASSEMBLY WELDS CATALYTIC CRACKING REGENERATOR THE RESULTS OF ULTRASOUND EXAMINATION

An example of a fairly sophisticated diagnostic testing and volume. The basic features that should look for when conducting the survey. Presents the method TOFD adaptation method for screening and evaluation damaged petrochemical equipment. References 22. Figures 4.

Keywords: ultrasonic control, diagnostic examination, the method TOFD

Поступила в редакцію
17.11.2016

ВИБРАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СТАНА 1150

А. В. БАГЛАЙ

ДП «ДИАМЕХ-УКРАИНА». 61105, г. Харьков-105, ул. Киргизская, 19, АБК-1.

E-mail: diamech@diamech.com.ua

Вибродиагностическим методом проведен неразрушающий контроль состояния подшипниковых опор главного привода горизонтальных валков стана 1150 ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ». Проанализированы причины выхода из строя подшипниковых узлов с последующей выдачей рекомендаций по разработке методик диагностирования приводов горизонтальных валков и определению оптимального технического решения для их реализации. Библиогр. 2, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, вибродиагностический метод, подшипниковые узлы, оценка технического состояния

По инициативе технического руководства ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» специалисты ДП «ДИАМЕХ-УКРАИНА» приняли участие в разработке методик и мероприятий по оснащению техническими средствами мониторинга и углубленной диагностики прокатных клетей и приводов обжимного стана 1150. Целью данной работы являлось проведение первичных измерений параметров вибрации подшипниковых опор главного привода горизонтальных валков (ГПГВ) стана 1150; контроль режима работы стана; анализ причин выхода из строя подшипниковых узлов с последующей выдачей рекомендаций по разработке методик диагностирования приводов горизонтальных валков и определение оптимального технического решения для их реализации. Контроль состояния оборудования осуществлялся виброанализатором «КВАРЦ» (№ 18675–99 в Государственном реестре средств измерительной техники, допущенных к применению в Украине) с расширительным блоком на 8 каналов. Составление маршрута, последующая обработка и анализ данных осуществлялись с использованием программы «ДИАМАНТ-2». Аппаратура и программные средства, использованные для диагностики, разработаны и производятся группой компаний «ДИАМЕХ».

Конструкция ГПГВ стана 1150. ГПГВ предназначен для передачи крутящего момента от электродвигателя к горизонтальным валкам через шпиндельное устройство. На ГПГВ установлено два (по одному на верхний и нижний валок) электродвигателя постоянного тока типа МПС 9000-66 мощностью 7200 кВт, $n = 53/80$ об/мин.

Конструкция привода горизонтального верхнего валка представляет собой вал ротора электродвигателя, соединенный при помощи жесткой муфты с промежуточным валом, который соединяется со

шпинделем при помощи универсального шарнира (рис. 1). Данная конструкция представляет собой жесткую трехопорную систему. Процесс прокатки на реверсивных станах кратковременный и сопровождается ударами при захвате слитка. При этом по мере удлинения заготовки время периода стабильной работы увеличивается. В соответствии с заданной калибровкой кроме направления вращения меняется частота вращения и обжатие заготовки.

Цикл прокатки включает следующие периоды: разгон валков вхолостую; захват слитка – сопровождается ударом из-за несовпадения скорости подаваемого слитка и линейной скорости поверхности вращающегося валка; механические колебания в системе привода сопровождаются раскрытием и закрытием зазоров во вкладышах шпинделей и зубчатых передачах, параметры механических колебаний определяются упруго-демпфирующими характеристиками элементов и зазорами; разгон со слитком; стационарный период работы с постоянной скоростью; снижение частоты вращения при окончании прокатки начинается при нахождении слитка в валках или после его выброса; выброс слитка; механические колебания в системе привода с меньшей амплитудой; остановка, пауза, реверсирование направления вращения и новый цикл прокатки. Для привода реверсируемых прокатных клетей необходимо разработать алгоритм

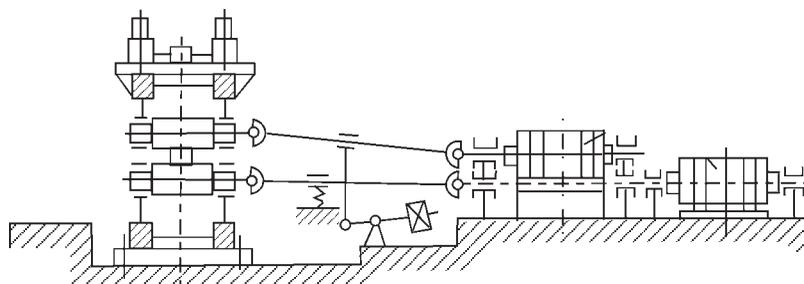


Рис. 1. Схема ГПГВ

диагностирования состояния механического оборудования с использованием методов вибрационной диагностики.

Схема измерений. Измерение параметров вибрации проводили в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита. Проведены измерения общих параметров вибрации, контурной диаграммы, частотной и временной формы вибрационного сигнала. Контролируемый частотный диапазон 10...1000 и 50...5000 Гц. Нумерация опор ГПГВ показана на рис. 2. Измерения проведены на опорах №8, №10 и №11. Проводились измерения контурных диаграмм подшипниковых опор. Запись сигналов начиналась перед первым проходом слитка. Спектры измерялись на последних проходах слитка. Контурные диаграммы снимались каскадами спектров параллельно (опора № 8 по семи каналам, опоры № 10 и № 11 по четырем каналам).

Результаты измерений. Результаты измерения параметров общего уровня вибрации приведены в таблице.

Измерение контурных диаграмм показало удовлетворительное состояние подшипниковой опоры № 8. На опоре № 10 вибрация в основании составила 2,7 мм/с, что превышает допусти-

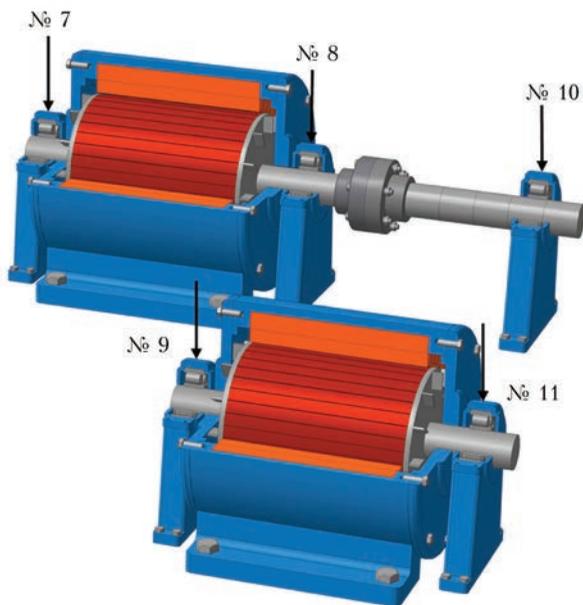


Рис. 2. Схема расположения и нумерация опор ГПГВ

Параметры вибрации для контрольных точек подшипников электродвигателей

Точка измерения (номер опоры)	Среднеквадратичное значение виброскорости (мм/с) в частотном диапазоне 10...1000 Гц для направлений измерений			Пиковое значение виброускорения $a_{пик}$ (m/c^2) в частотном диапазоне 50...5000 Гц для направлений измерений		
	вертикальное	горизонтальное	осевое	вертикальное	горизонтальное	осевое
8	–	0,5	–	0,09	0,08	0,19
10	0,6	0,8	–	0,26	0,09	0,18
11	1,2	0,9	–	0,31	0,19	–

мые значения; виброперемещения превышают 150 мкм. На опоре № 11 обнаружено ослабление крепления крышки подшипника. Спектральный анализ показал, что в спектрах виброскорости и виброускорения присутствуют ударные составляющие и низкочастотные в диапазоне до 1000 Гц с малой амплитудой (рис. 3).

Визуальным осмотром обнаружено проседание опоры № 10 – заметны полная и секторальная риски на промежуточном валу в результате задевания о корпус нижнего электродвигателя.

Предварительные выводы. По общему уровню вибрации: значения виброскорости соответствуют удовлетворительному состоянию при длительном режиме прокатки слитка на последних проходах;

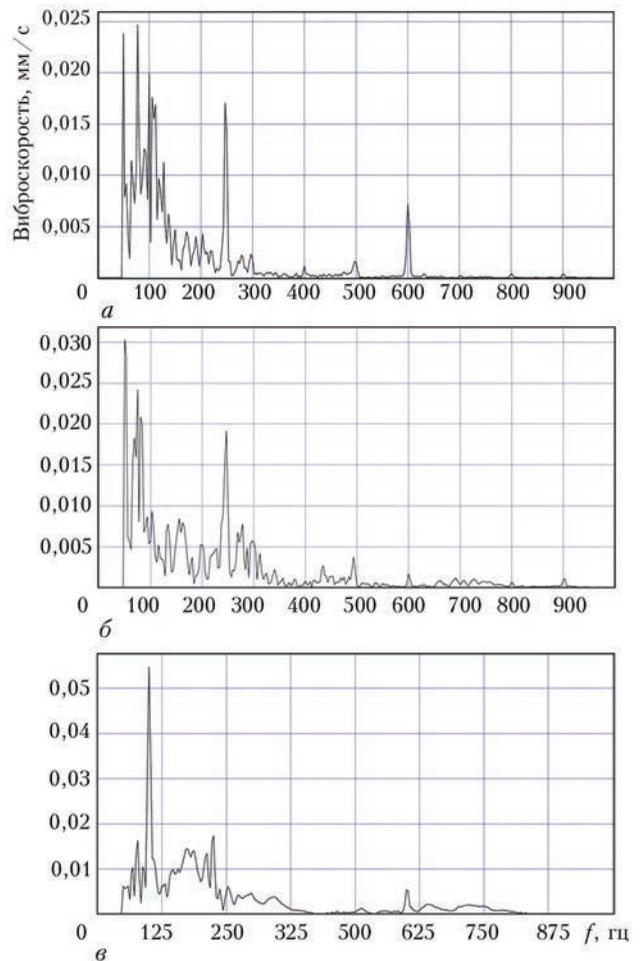


Рис. 3. Спектр виброскорости подшипниковых опор: № 8 (а), № 10 (б), № 11 (е)

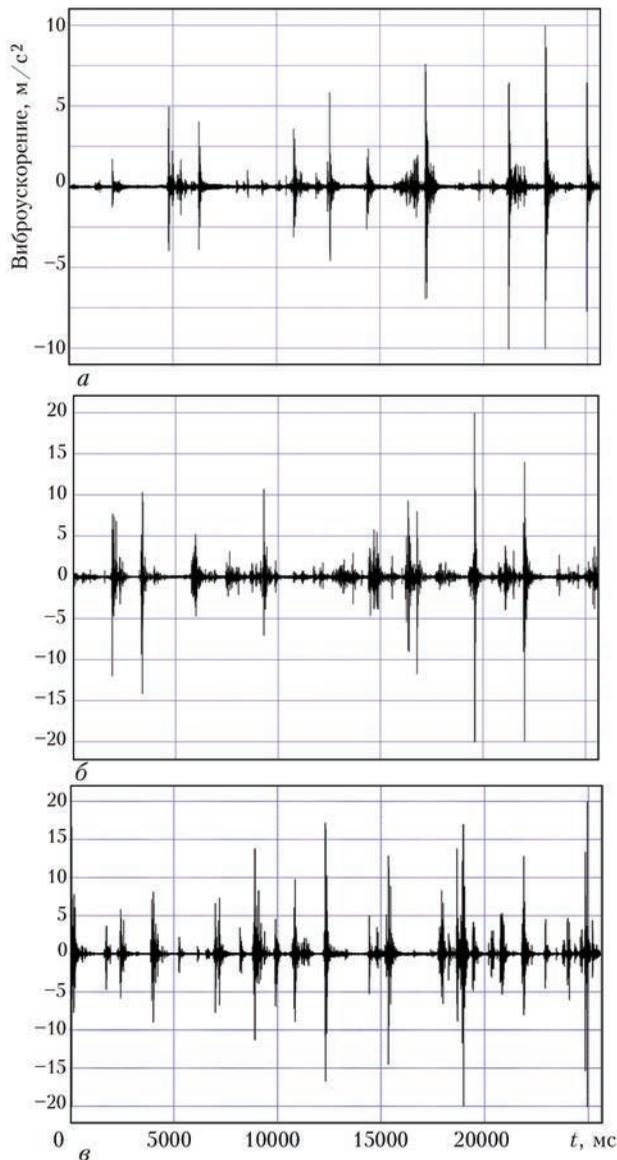


Рис. 4. Дампы временных сигналов подшипниковых опор: № 8 (а), № 10 (б), № 11 (в) (вертикальное направление)

значения виброускорения соответствуют хорошему состоянию; на опоре № 11 преобладает вертикальная, а на опоре № 10 – горизонтальная составляющая. Увеличенная осевая составляющая на опоре № 8 может быть вызвана проседанием опоры № 10.

По контурным диаграммам: контурная диаграмма опоры № 10 соответствует неустойчивому фундаменту; значения виброперемещения превышают 150 мкм.

По спектральному анализу: фиксируемые частоты составляющих вибрации 12,5; 56; 75; 100; 246,9 Гц и другие при частоте вращения двигателя около 60 об/мин не могут быть использованы при идентификации повреждений подшипников скольжения. В спектрах виброускорения присутствуют ударные и низкочастотные составляющие в диапазоне до 1000 Гц с малой амплитудой. Это позволяет сделать вывод об удовлетворительном состоянии подшипников скольжения.

По временному анализу: во временной диаграмме опоры № 11 просматриваются более частые удары по сравнению с опорой № 10 – возможны неисправности муфты или шпиндельного устройства. Размах колебаний виброускорения одинаковый – 40 м/с², но частота ударов по опоре № 11 примерно вдвое больше. Размах виброускорения на опоре № 8 примерно вдвое ниже (до 20 м/с²) – это указывает на источник ударов – закрытие зазоров во вкладышах шпинделей (рис. 4).

Обобщая сказанное выше, можно заключить, что состояние подшипников опор № 8, № 10 и № 11 привода горизонтальных валков по данным проведенных первичных измерений удовлетворительное. Возможные неисправности: проседание подшипниковой опоры № 10; неплотное прилегание корпусных деталей (опоры и фундамента); ослабление резьбовых соединений. Чтобы исключить предполагаемые неисправности рекоменду-

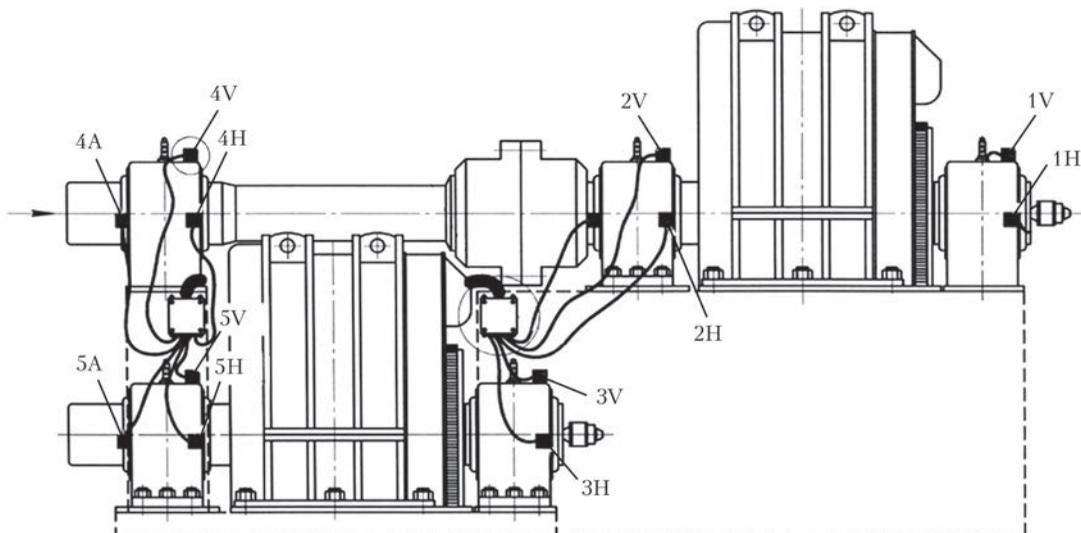


Рис. 5. Схема расположения измерительного оборудования на ГППВ. Направления измерений: V – вертикальное; H – горизонтальное; A – осевое (цифры – номера подшипников)

ется обеспечить плотное прилегание корпусных деталей; обеспечить тарированную затяжку резьбовых соединений; проверить соосность подшипниковых опор. Для диагностирования состояния подшипников опор №№ 7–11 привода горизонтальных валков необходим системный анализ данных по всем подшипниковым опорам привода в реальном масштабе времени, т. е. непрерывно (рис. 5).

Оценка технического состояния проводилась путем измерения уровня вибрации и сравнения с нормативными значениями, регламентированными ГОСТ 20815–93 [1]. Допустимое значение виброскорости – 2,8 мм/с. Дополнительно учтено требование – пиковое значение виброперемещения подшипниковых опор крупных машин с частотой вращения менее 600 об/мин не должно превышать 50 мкм.

По данным проведенного первичного измерения параметров вибрации подшипниковых опор ГПГВ стана 1150 сделать однозначное заключение о его техническом состоянии не представляется возможным по следующим причинам: ГПГВ работает в реверсном режиме; скорость вращения изменяется нестабильно; присутствуют знакопеременные ударные воздействия. Следовательно, применение в качестве оценки вибрации нормы ГОСТ 20815–93 некорректно. Необходимо отметить уникальность оборудования для решения задач диагностирования стана 1150. Оно может стать доступным после установки стационарной системы вибрационного контроля и разработки алгоритма раннего диагностирования. Изучение динамических процессов, их взаимосвязи с параметрами, определяющими техническое состояние узлов, при одновременном учете конструктивных и технологических параметров является одним из важных компонентов, позволяющих разрабатывать новые методы вибрационной диагностики технического состояния оборудования прокатных станов [2].

Выводы

Для решения задачи по технической диагностике состояния подшипниковых опор ГПГВ стана 1150 и разработке методик диагностирования необходимо их оснащение стационарным комплексом контроля и диагностики промышленного оборудования.

Требования к стационарному комплексу: параллельное измерение и регистрация вибрационных параметров; контроль временных реализаций вибрационного сигнала; возможность сохранения данных измерений с последующим анализом; возможность аппаратного и программного расшире-

ния. Методическая обработка результатов вибрационных измерений и расчет пороговых уровней для различных зон технического состояния. Возможное аппаратное и программное дооснащение стационарного комплекса контроля и диагностики промышленного оборудования с учетом выработанных методик диагностирования.

Список литературы

1. ГОСТ 20815–93 «Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерение, оценка и допустимые значения». Межгосударственный стандарт.
2. Диагностика и динамика прокатных станов / В. В. Веревнев и др. // Днепропетровск, ИМА-пресс, 2007. – 144 с.

References

1. GOST 20815–93 «Mashiny elektricheskiye vrashchayushchiyesya. Mekhanicheskaya vibratsiya nekotorykh vidov mashin s vysotoy osi vrashcheniya 56 mm i boleye. Izmereniye, otsenka i dopustimye znacheniya». Mezghosudarstvenny standart. [in Russian].
2. Diagnostika i dinamika prokatnykh stanov / V. V. Verenev i dr. // Dnepropetrovsk, IMA-press, 2007. – 144 c. [in Russian].

А. В. БАГЛАЙ

ДП «ДІАМЕХ-УКРАЇНА».

61105, м. Харків-105, вул. Киргизька, 19, АБК-1.

E-mail: diamech@diamech.com.ua

ВІБРАЦІЙНЕ ОБСТЕЖЕННЯ СТАНУ 1150

Вібродіагностичним методом проведено неруйнівний контроль стану підшипникових опор головного приводу горизонтальних валків стану 1150 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ». Проаналізовано причини виходу з ладу підшипникових вузлів з подальшим видаванням рекомендацій щодо розробки методик діагностування приводів горизонтальних валків і визначення оптимального технічного рішення для їх реалізації. Бібліогр. 2, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: неруйнівний контроль, вібродіагностичний метод, підшипникові вузли, оцінка технічного стану

A. V. BAGLAI

SE «DIAMEX-UKRAINE».

ABK-1, 19, Kirgyzskaya str., 61105, Kharkov-105.

E-mail: diamech@diamech.com.ua

VIBRATIONAL TESTING OF MILL 1150

Vibrodiagnostic method was used to perform non-destructive testing of the state of bearing supports of the main drive of horizontal rolls of slabbing mill 1150 at PJSC «ZAPOROZHSTAL». Causes for malfunction of bearing assemblies were analyzed with subsequent issuing of recommendations on development of procedures of diagnostics of horizontal shaft rolls and finding the optimum engineering solution for their realization. 2 References, 1 Tables, 5 Figures.

Keywords: nondestructive testing, vibrodiagnostic method, bearing assemblies, evaluation of technical state

Поступила в редакцию
29.01.2017

ПРИМЕНЕНИЕ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПРИ РЕМОНТЕ СМЕСИТЕЛЯ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В. И. СУХОМЛИН¹, В. И. ВОЛОХ², А. А. ТАРАНЕНКО³

¹Приднепров. гос. академия строительства и архитектуры. 49600, г. Днепр, ул. Чернышевского, 24-а.

E-mail: alma31@mail.ru

²ПАО «Днепров. металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского». 51925, г. Каменское-25, ул. Кирова, 18Б. E-mail: aliha04@rambler.ru

³ГП «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады». 49000, г. Днепр, ул. Писаржевского, 1а. E-mail: lab241@i.ua

Проведено обследование корпуса смесителя по выявлению участков с повышенными зонами напряжений по величине коэрцитивной силы. Представлены результаты контроля корпуса смесителя по величине коэрцитивной силы. Предложен способ снижения напряжений на внутренней поверхности корпуса смесителя. Библиогр. 4, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: коэрцитиметрический метод контроля, доменное производство, корпус смесителя, зоны напряжений

Коэрцитивная сила (КС) является характеристикой напряженно-деформированного состояния ферромагнитных сталей, поэтому это один из наиболее чувствительных методов контроля структуры металла [1]. В данной работе проведен магнитный контроль с целью определения уровня напряженно-деформированного состояния внутренней поверхности корпуса смесителя и определения зон повышенной концентрации напряжений [2].

В доменном цеху используется смеситель для получения вязущей массы для забивки чугунной летки доменной печи (рис. 1). Для разогрева вязущей смеси через отверстия в корпусе смесителя подается пар. Корпус смесителя представляет собой конструкцию, состоящую из сваренных между собой сформованных листов из стали 09Г2С.

В процессе эксплуатации корпус смесителя периодически ремонтировали из-за появления трещин в сварных швах на его внутренней поверхности (рис. 2).

Ремонтные работы (разделявание и последующая заварка трещин) не приводили к желаемому результату – трещины периодически появлялись

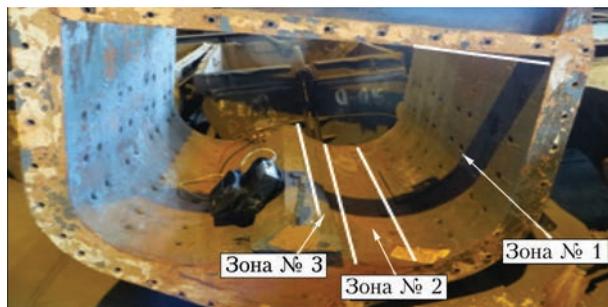


Рис. 1. Корпус смесителя для приготовления вязущей массы: зона №1–зона №3 – критические зоны

© В. И. Сухомлин, В. И. Волох, А. А. Тараненко, 2017

вновь. Для определения причин появления трещин в сварных швах смесителя авторами работы было принято решение исследовать уровень напряженного состояния ремонтируемых участков корпуса [3]. С этой целью был применен магнитный коэрцитиметрический метод, который зарекомендовал себя высокой чувствительностью при исследовании технического состояния ферромагнитных низколегированных сталей.

Контроль проводили магнитным структуроскопом КРМ-Ц-К2М с установкой датчика вдоль распространения трещин. Установить датчик поперек корпуса не представляется возможным, так как смеситель имеет полукруглую форму в зоне трещин. Для удобства анализа полученных значений по H_c корпус смесителя условно разбит на три рабочих зоны (см. рис. 1).

Результаты обследования магнитным коэрцитиметрическим методом внутренней поверхности корпуса смесителя представлены в табл. 1.

Результаты контроля были обработаны с помощью компьютерной программы и представлены на рис. 3. На визуализированной развертке име-



Рис. 2. Увеличенные участки с трещинами в зоне сварных швов

Таблица 1. Результаты контроля КС корпуса смесителя до ремонта

Номер зоны	Значения коэрцитивной силы H_c , А/см, в точках контроля								Примечание
1	1,5	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,5	1,5	Зона без сварных швов
	1,5	1,3	1,6	1,4	1,6	1,3	1,6	2,1	
	2,0	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,5	2,1	
	1,7	1,3	1,4	1,4	1,3	1,3	1,7	1,7	
	1,8	1,4	1,4	1,3	1,3	1,5	1,7	1,5	
	1,6	1,5	1,5	Накладка (измерения не проводились)		1,5	1,4	1,5	
	1,6	1,9	1,6			1,5	1,6	1,4	
	1,8	2,0	3,4			1,5	1,6	1,3	
2	4,7; 4,4; 5,0; 3,5; 5,3; 3,6; 5,4; 3,5; 5,1; 4,7; 4,6; 5,5; 4,5; 5,4; 4,5; 1,6								Зона ремонтного сварного шва
3	0,9	1,2	1,1	1,4	0,9	0,9	0,9	0,9	Зона без сварных швов

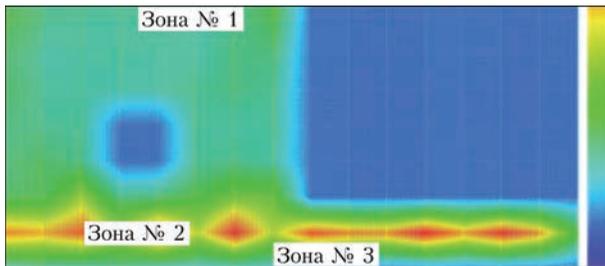


Рис. 3. Распределение КС и местоположение неблагоприятных (критических) зон на корпусе смесителя до ремонта (визуализированная развертка)

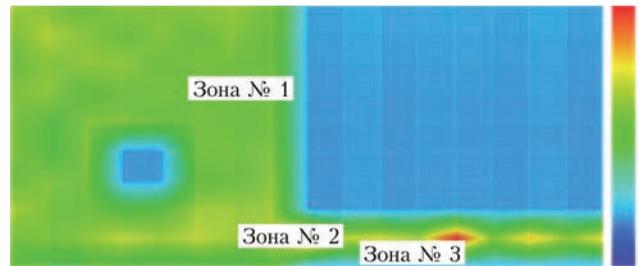


Рис. 5. Визуализированная развертка по распределению H_c и местоположение измененных (стабилизированных) зон на корпусе смесителя после проведения отжига в печи

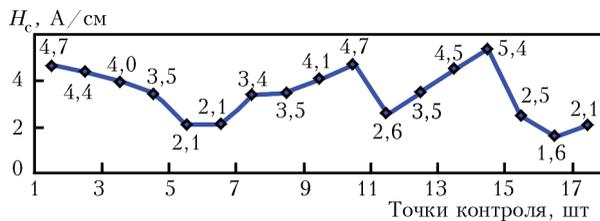


Рис. 4. График распределения H_c по зоне № 2 ремонтного сварного шва (условные обозначения – точки контроля)

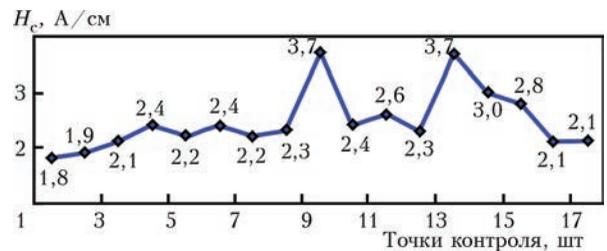


Рис. 6. График распределения КС после проведения отжига в печи

ются участки с повышенными значениями КС (зона № 2), где они отличаются от среднего значения в несколько раз, что свидетельствует о повышенном напряжено-деформированном состоянии металла в этих местах.

График распределения величины КС в зоне сварного шва (зона № 2) вдоль ремонтного шва до отжига приведен на рис. 4.

В зонах № 1 и № 2 коэрцитиметрический контроль зафиксировал однородные без значительных перепадов значения КС. В зоне № 3 значения КС

превышали рядом находящиеся значения в два раза, что свидетельствовало о концентрации напряжений. Опасность образования трещин наиболее вероятно имела место на участках с КС более 4,5 А/см. Рабочий режим смесителя с частыми остановками-пусками технологического оборудования может инициировать напряжения в этих сварных швах, способные вызвать растрескивание металла.

На основании анализа состояния исследованного сварного шва (зона № 2) принято решение

Таблица 2. Результаты контроля величины КС корпуса после отжига в печи

Номер зоны	Значения коэрцитивной силы H_c , А/см, в точках контроля								Примечание
1	2,1	1,9	1,7	2,0	1,9	2,0	2,1	1,8	Зона металла без сварных швов
	1,8	2,3	2,0	1,7	2,0	1,7	2,0	1,7	
	1,7	2,0	2,1	2,1	1,8	1,9	1,9	1,8	
	1,9	2,1	1,6	1,8	1,9	1,8	1,7	1,9	
	1,9	1,6	2,0	2,0	1,8	1,9	1,8	1,9	
	1,9	1,5	2,0	Накладка (измерения не проводились)		1,9	1,9	2,0	
	1,7	2,0	1,9			1,7	1,8	2,1	
2	2,2 1,9 1,8 1,5 1,6 2,2 2,2 2,2								Зона ремонтного сварного шва
3	1,8; 1,9; 2,1; 2,4; 2,2; 2,4; 2,2; 3,7; 2,4; 2,6; 2,3; 3,7; 2,0; 2,8; 2,1; 2,79								Зона металла без сварных швов

провести отжиг корпуса смесителя для снижения внутренних напряжений и приведения структуры в равновесное состояние [4].

Схема отжига включала нагрев корпуса смесителя со скоростью 80 °С/ч до 800...850 °С, выдержку 3 ч при этой температуре и охлаждение с печью.

Термическая обработка корпуса, а именно отжиг смесителя, способствовала снижению напряжений и приведению структуры металла в более стабильное состояние (табл. 2). Нагрев выше 850 °С обеспечил полную перекристаллизацию стали.

Проведена обработка полученных после отжига данных коэрцитиметрического контроля с помощью компьютерной программы.

Как следует из рис. 5, значения КС стали более однородными (зона № 1), уменьшились количество неблагоприятных зон (зона № 2).

На рис. 5 приведен график распределения величины коэрцитивной силы в зоне ремонтного сварного шва (зона № 2) после отжига.

Выводы

По результатам магнитного контроля отремонтированного смесителя установлено, что в его верхней части значения коэрцитивной силы однородные и находятся в диапазоне 1,6...2,1 А/см.

В зоне стыкового сварного шва значения коэрцитивной силы составляет от 1,8 до 2,2 А/см, значения однородные.

В зоне ремонтных сварных швов величина коэрцитивной силы составляет от 1,9 до 3,7 А/см, что значительно меньше, чем до проведения отжига. Резких перепадов значений КС не обнаружено. Произошло снижение величины коэрцитивной силы на 1,5...2,0 А/см. Однако в двух местах этой зоны есть места (наплавка сварного шва) (см. рис. 6), где $H_c = 3,7$ А/см.

Благодаря снижению уровня и концентрации напряжений зафиксированных коэрцитиметрическим методом, в результате ремонта удалось исключить трещины в сварном шве, что позволило продлить эксплуатацию смесителя.

Список литературы

1. Контроль усталости металла неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом / В. И. Романенко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 3. – С. 56–58.
2. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль. Справочник: В 7 т; под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6: Магнитный контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
3. Безлюдько Г. Я., Марченко А. Ю., Соломаха Р. Н. Обзорная оценка общего состояния и детальная экспертиза усталости металла объектов нефтехимических производств коэрцитиметрическим методом // *В мире неразрушающего контроля*. – 2012. – № 1. – С. 13–17.
4. Сухомлин В. И., Волох В. И. Анализ стойкости магнитного состояния образцов от температурного влияния // *Производственная лаборатория*. – 2011. – № 5(38). – С. 30–32.

References

1. Kontrol ustalosti metalla nerazrushayushchim magnitnym (koertsimetriceskim) metodom / V. I. Romanenko i dr. //

Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – 2009. – № 3. – С. 56–58. [in Russian].

2. Yermolov I. N., Lange Yu. V. Nerazrushayushchy kontrol. Spravochnik: V 7 t; pod obshch. red. V. V. Klyuyeva. T. 6: Magnitny kontrol. – M.: Mashinostroyeniye, 2004. – 864 s. [in Russian].
3. Bezlyudko G. Ya., Marchenko A. Yu., Solomakha R. N. Obzornaya otsenka obshchego sostoyaniya i detalnaya ekspertiza ustalosti metalla obyektov neftekhimicheskikh proizvodstv koertsimetriceskim metodom // *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. – 2012. – № 1. – С. 13–17. [in Russian].
4. Sukhomlin V. I., Volokh V. I. Analiz stoykosti magnitnogo sostoyaniya obraztsov ot temperaturnogo vliyaniya // *Proizvodstvennaya laboratoriya*. – 2011. – № 5(38). – С. 30–32. [in Russian].

В. И. СУХОМЛИН¹, В. И. ВОЛОХ², А. О. ТАРАНЕНКО³

¹Придніпров. держ. академія будівництва та архітектури. 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, 24-а. E-mail: alma31@mail.ru

²ПАО «Дніпров. металургійний комбінат ім. Ф. Е. Дзержинського». 51925, м. Кам'янське, вул. Кірова, 18Б. E-mail: aliha04@rambler.ru

³ДП «Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний ін-т трубної промисловості ім. Я. С. Осади». 49000, м. Дніпро, вул. Писаржевського, 1а. E-mail: lab241@i.ua

ЗАСТОСУВАННЯ КОЕРЦИТИМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЗМІШУВАЧА ПІД ЧАС РЕМОНТУ У ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Проведено обстеження корпусу змішувача з виявлення ділянок з підвищеними зонами напружень за величиною коерцитивної сили H_c . Представлені результати контролю за H_c корпусу змішувача. Запропоновано спосіб зниження напружень на внутрішній поверхні корпусу змішувача. Бібліогр. 4, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: коерцитиметричний метод контролю, доменне виробництво, корпус змішувача, зони напружень

V.I.SUKHOMLIN¹, V.I.VOLOKH², A.A.TARANENKO³

¹Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 49600, Chernyshevskogo 24-a str., 49600, Dnepr. E-mail: alma31@mail.ru

²PJSC «Dneprovsky Iron & Steel Works aft. F. Dzerzhinsky», 18B Kirov str., 51925, Kamenskoye. E-mail: aliha04@rambler.ru

³SE «Ya. E. Osada Pipe Research Institute», 1a, Pysarzhevskii str., 49000, Dnepr. E-mail: lab241@i.ua

APPLICATION OF COERCIMETRIC METHOD OF TESTING IN REPAIR OF A MIXER IN BLAST-FURNACE PRODUCTION

Examination of mixer body was performed to detect areas with increased stress zones by the magnitude of coercive force H_c . The paper presents the results on H_c of mixer body. A method to lower stresses on inner surface of mixer body is proposed. 4 References, 2 Tables, 6 Figures.

Keywords: coercimetric testing method, blast-furnace production, mixer body, stress zones

Поступила в редакцию
04.11.2015

8-а НАЦІОНАЛЬНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ ТА ВИСТАВКА «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА: UkrNDT-2016»

22–24 листопада 2016 р. у м. Києві у Міжнародному виставковому центрі на лівому березі Дніпра відбулася помітна подія в житті наукової спільноти України в галузі НК та ТД – 8-а Національна науково-технічна конференція та виставка. Конференція проходила в дні роботи XV Міжнародного промислового форуму-2016, у рамках якого було представлено 10 спеціалізованих виставок, зокрема з демонстрацією досягнень організацій України в галузі приладів для НК.

Треба відзначити, що за чотири роки з часу проведення 7-ї конференції з НКТД в 2012 р. наукова спільнота України з нетерпінням чекала на подібний захід в Україні. Підтвердженням цього є багато спеціалістів з НК та ТД, які були присутні на конференції – понад 140 представників з різних регіонів України.

Організатором заходу виступило Українське товариство з неруйнівного контролю та технічної діагностики, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України та Міжнародний виставковий центр.

Генеральним спонсором 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки виступила **НВФ «Діагностичні прилади»**, спонсорами – *АЦНК ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та НВФ «Промсервісдіагностика»*.

Інформаційну підтримку заходу здійснювали видання «НК-інформ», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Автоматическая сварка», «Методи та прилади контролю якості».

Тематика 74 доповідей наукових працівників та спеціалістів з НК та ТД з різних регіонів України була представлена на пленарному засіданні конференції (15 доповідей) та чотирьох секціях:

1. Методи та засоби моніторингу технічних об'єктів (32 доповіді);
2. Розробка методів і нових технічних засобів НК та ТД стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації (8 доповідей);
3. Теорія і практика методів НК та ТД (12 доповідей);
4. Питання забезпечення якості і підготовки персоналу (7 доповідей).

На пленарному засіданні з привітанням до учасників конференції звернувся голова УТ НК та ТД, академік Міжнародної академії неруйнівного контролю професор В. О. Троїцький, який відмітив, що найважливішими питаннями конферен-

ції є теорія і практика фізичних методів НК та ТД, комп'ютерна та цифрова обробка в області НК, моніторинг технічного стану та оцінка залишкового ресурсу об'єктів при експлуатації, підвищення безпеки і надійності об'єктів.

Окремо він відзначив лише деякі напрями наукових досліджень, що представлені в збірнику праць конференції:

- портативний рентгентелевізійний контроль;
- низькочастотна УЗ діагностика протяжних металоконструкцій без сканувань їх поверхні;
- використання цифрової техніки для обробки оптичних і рентгеновських зображень;
- комп'ютерна термографія та ін.

Пленарне засідання продовжилося виступами провідних спеціалістів України з аналізом основних напрямків розвитку методів, технологій та технічних засобів для НК та ТД технічного стану різноманітних промислових об'єктів. У своїй доповіді професор В. О. Троїцький відмітив, що великим успіхом користуються вітчизняні розробки щодо підвищення в десятки разів продуктивності магнітопорошкового контролю шляхом здійснення рухомого пошукового сканування поверхні досліджуваного об'єкта в різних напрямках.

Член-кореспондент НАН України В. П. Бабак у своїй доповіді приділив увагу застосуванню безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для постійного моніторингу об'єктів теплоенергетичного комплексу: теплових електростанцій (ТЕС) та теплових мереж. БПЛА дозволяють оперативно та дистанційно контролювати шкідливі викиди в атмосферу, проводити дистанційний контроль стану теплових мереж тощо.

Професор М. О. Карпаш подав доповідь про розвиток методів багатопараметрового діагностування металоконструкцій тривалої експлуатації.

Значна увага у доповідях на пленарному засіданні конференції була приділена застосуванню електромагнітних методів визначення напружено-деформованого стану конструкцій із феромагнітних матеріалів (канд. техн. наук В. М. Учанин), діагностуванню авіаційної техніки (професор І. П. Білокур), аналізу вірогідності контролю (професор С. М. Маєвський), моніторингу процесів експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів авіаційних конструкцій засобами вихрострумової структуроскопії (канд. техн. наук В. М. Учанин) тощо. Особливий інтерес учасників конференції викликала доповідь Ю. М. Посипайка з технічно-

го діагностування засобами неруйнівного контролю резервуара РВС-200 на українській антарктичній станції «Академік Вернадський».

На засіданні секції № 1, яке проводив заступник директора Інститута технічної теплофізики НАН України член-кор. НАН України В. П. Бабак, значна частина доповідей була присвячена методам та засобам моніторингу технічного стану різноманітних відповідальних промислових об'єктів, які давно знаходяться в експлуатації й вимагають продовження експертного висновку відносно терміну їх безпечної експлуатації. Це стосується продовження терміну експлуатації окремих частин енергоблоків ВВЕР-1000, котлів теплових електростанцій, моніторингу огорожувальних конструкцій будівель, діагностування технічного стану теплоенергетичного обладнання, визначенню залишкового ресурсу металоконструкцій довготривалої експлуатації з урахуванням напруженого стану. Значна частина доповідей була присвячена методам контролю ізоляції підземних трубопроводів, протикорозійного захисту підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів, оцінці розмірів корозійних точок на поверхні металу трубопроводу, статистичному аналізу акустичних сигналів витоків рідини із трубопроводів. Було розглянуто також застосування нейромережових технологій в комп'ютеризованих системах діагностики виробів із композитних матеріалів, концепції створення інформаційної системи для діагностики та моніторингу технічного стану вузлів авіаційної техніки, використанню фазових решіток в ультразвуковому контролі, зокрема для контролю колісних пар залізничних вагонів у процесі експлуатації. В окремих доповідях розглядалися проблеми виявлення та оцінки втрат природного газу на автомобільних газонаповнювальних компресорних станціях, впровадження пристрою для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу, контролю міжфазових властивостей на межі розділу фаз «нафта–розчин поверхнево-активної речовини».

На засіданні секції № 2, яке проводив директор Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАНУ академік НАНУ З. Т. Назарчук, були представлені доповіді з виконання першого етапу робіт Цільової комплексної програми НАН Украї-

ни «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (програма «Ресурс»). У представлених авторами доповідях розглядалися концепції, підходи та методи побудови апаратно-програмних комплексів, систем діагностування виробів та конструкцій в різних галузях промисловості України: композитних конструкцій авіакосмічної техніки, обертових вузлів складних машинних комплектів тощо. Основна увага у доповідях приділялася використанню різноманітних методів НК: акустичної емісії, магнітопорошкового контролю, вібродіагностичного методу, вихрострумове та рентгентелевізійного контролю на основі твердотільних детекторів.

Доповіді на секції № 3 були присвячені деяким питанням теорії і методів НК та ТД, зокрема: проблемі визначення фактичної площі сухого акустичного контакту в системі перетворювач–виріб при дефектоскопії протяжних трубопровідних систем низькочастотними УЗ спрямованими хвилями, визначенню товщини стінки матеріалу оболонки вихрострумове методом, розробці алгоритмів класифікації технічного стану матеріалів за результатами акустичного контролю. Ряд доповідей було присвячено методиці оцінювання інформаційних сигналів вихрострумове перетворювача, імпедансного дефектоскопу та точності визначення фазових характеристик сигналів під час контролю деталей авіаційної техніки із композиційних матеріалів.

На секції № 4 розглядалися питання технологічного управління якістю та експлуатаційними властивостями виробів у зварювальному виробництві, оцінці ризику експлуатації зварних конструкцій на підставі моніторингу процесів управління якістю та питання підготовки зварювального виробництва як основи для створення безпечних конкурентоздатних зварних конструкцій в машинобудуванні.

Особлива увага на конференції була приділена аналізу систем міжнародної та національної стандартизації в сфері НК, застосуванню Міжнародного стандарту ISO 9712 у промисловості України для сертифікації персоналу з НК, розробці алгоритмів підготовки кандидатів до атестації та сертифікації персоналу з НК, атестації та сертифікації персоналу з НК в атомній промисловості.



Повні тексти доповідей опубліковано на 380 сторінках збірника матеріалів конференції, який отримали її офіційні учасники. В електронному вигляді з ними можна ознайомитися також на веб-сайті УТ НКТД: usndt.com.ua.

Організатори конференції висловлюють вдячність спеціалістам, які взяли участь в науковій програмі конференції, а також її спонсорам і учасникам виставки.

В рамках 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016» 22 листопада 2016 р. відбулась чергова Звітна конференція УТ НКТД, на якій було розглянуто і обговорено звіт Правління УТ НКТД про роботу за період 2013–2016 рр., підведено підсумки П'ятого професійного конкурсу УТ НКТД і нагороджені його переможці, відзначені лауреати Почесної відзнаки УТ НКТД «За досягнення в галузі неруйнівного контролю», відбулися вибори голови, правління і ревізійної комісії УТ НКТД на період 2017–2019 рр., а також розглянуто питання внесення змін до Статуту Товариства.

Голова УТ НКТД професор В. О. Троїцький доповів делегатам Звітної конференції про головні напрямки і результати роботи Правління Товариства за звітний період:

- виконання робіт із гармонізації європейських і міжнародних стандартів з НК в Україні;
- організація участі делегації УТ НКТД в роботі 11-ї Європейської конференції з неруйнівного контролю в Празі;
- організація участі спеціалістів УТ НКТД в 19-й Всесвітній конференції з НК в Мюнхені і участі колективних членів УТ НКТД в інформаційному наповненні стенду Товариства;
- організація практичних семінарів з питань сертифікації і освоєння нової техніки;
- проведення 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання»;
- організація 8-ї Національної науково-технічної конференції «НК та ТД – UkrNDT-2016»;
- проведення П'ятого професійного конкурсу УТ НКТД в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики;
- участь УТ НКТД в європейських наукових проєктах;
- участь спеціалістів УТ НКТД у заходах, що проводилися міжнародними організаціями з НК: ICNDT, EFNDT, ANDTI, ISO/TC 135;
- співпраця з Американським товариством з НК (ASNT), початок створення в Україні секції ASNT;

- випуск «Інформаційного бюлетеня «НК-Інформ», підтримка інтернет-сайту Товариства;
- розміщення наукових статей та інформаційних публікацій про діяльність УТ НКТД на сторінках журналів Американського, Японського товариств з НК, міжнародного журналу «Территория NDT».

На засіданні правління УТ НКТД, що відбулося перед Звітною конференцією, був заслуханий Звіт конкурсної комісії і одногосно затверджені результати П'ятого професійного конкурсу УТ НКТД, що проводився з метою визначення і популяризації досягнень кращих вчених, спеціалістів, трудових колективів, лабораторій, фірм, підприємств та організацій, що працюють в галузі НКТД, за наступними напрямками та формами професійної діяльності:

- кращі промислові і сервісні лабораторії, що працюють в галузі НКТД;
- кращі науково-технічні публікації в журналах та видання книг;
- кращі молоді вчені та спеціалісти, що працюють в галузі НКТД;
- кращий студент (аспірант) за спеціальністю «НК та ТД».

Ознайомив делегатів про перебіг конкурсу О. В. Мозговой, а професор О. М. Карпаш оголосив переможців. Дізнатися імена переможців конкурсу можна на сайті УТ НКТД за посиланням: http://usndt.com.ua/ua_konkursy.htm.

З нагоди 25-річчя від дня заснування Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики Правління УТ НКТД вирішило встановити Почесну відзнаку «За досягнення в галузі неруйнівного контролю» та відзначити нею заслуги спеціалістів, що сприяли становленню і розвитку Товариства, набуттю та зміцненню його авторитету серед українських фахівців і на міжнародному рівні, вели активну суспільну діяльність в галузі НК та ТД.

Почесну відзнаку отримали: В. П. Бабак, І. П. Білокур, Ю. К. Бондаренко, З. Ю. Главацька, В. І. Дружинін, М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш, О. М. Козін, Л. В. Литвиненко, Л. М. Лобанов, Г. Г. Луценко, С. Р. Михайлов, О. В. Мозговой, О. В. Павлій, Ю. М. Посипайко, В. О. Стороженко, В. О. Троїцький, В. М. Учанін, В. О. Цечаль, І. Я. Шевченко, А. Л. Шекеро.

Далі делегати конференції обрали голову та правління УТ НКТД на період 2017–2019 рр. Головою УТ НКТД було переобрано професора В. О. Троїцького, д-ра техн. наук, завідуючого відділом Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. З персональним складом нового Правління можна ознайомитись на сайті УТ НКТД за посиланням http://usndt.com.ua/ua_struktura.htm.

*А. Л. Шекеро, Ю. М. Посипайко, О. Г. Бондаренко
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України*

ПОДПИСКА — 2017

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
240 грн.	480 грн.	1800 руб.	3600 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.



Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «АС-Медиа», «ПресЦентр Киев», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
 на сайте: www.patonpublishinghouse.com.

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
 Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
 В 2016 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2015 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вкладышах следующих размеров

- Первая страница обложки (190x190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200x290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200x290 мм)
- Вклейка А4 (200x290 мм)
- Разворот А3 (400x290 мм)
- 0,5 А4 (185x130 мм)
- 0,25 А4 (90x130 мм)
- Размер журнала после обрезки 200x290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации. Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади

- Публикуется только профильная реклама (техническая диагностика и неразрушающий контроль)

- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:
 Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 15.03.2017. Формат 60x84/8. Офсетная печать.
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
 Печать ООО «Фирма «Эссе».
 03142, г. Киев, просп. Академика Вернадского, 34/1.