

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, З. А. Майдан (отв. секр.),

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. Стрыжало

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. Ключев

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

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

М. Г. Чаусов

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

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,

ул.Казимира Малевича, 11

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

Редакторы

Л. Н. Герасименко, 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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- ПАТОН Б. Е., ЛОБАНОВ Л. М., НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ОВСИЕНКО М. А., ЯРЕМЕНКО М. А., ГЕРЕБ Я., ВАРГА Л., ФЕДЧУН А. Ю., ЕЛКИН А. А., ОБОДОВСКИЙ Б. М., КРАЕВСКИЙ В. Н., ВАСИЛЬЕВ А. С., КУШНИРЕНКО С. А.** Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе) 3
- ЛОБАНОВ Л. М., ЗНОВА В. А., ПИВТОРАК В. А., КИЯНЕЦ И. В.** Диагностика композиционных элементов авиационных конструкций методом электронной широгрaфии..... 19
- ГУДРАМОВИЧ В. С., РЕПРИНЦЕВ А. В., РЯБОКОНЬ С. А., САМАРСКАЯ Е. В.** Оценка ресурса конструкций ракетно-космической техники при учете влияния концентраторов напряжений в виде отверстий 28
- ШАПОВАЛОВ Е. В., КОЛЯДА В. А., ЛУЦЕНКО Н. Ф., МАНГОЛЬД А. Н.** Автоматизированный контроль технического состояния колесных пар вагонов во время движения поездов 37
- БАРВИНКО А. Ю., БАРВИНКО Ю. П.** О возможности предотвращения лавинных разрушений стенки цилиндрических резервуаров для хранения нефти путем применения листовой стали с повышенным значением ударной вязкости 44
- БАЗАЛЄЄВ М. І., БРЮХОВЕЦЬКИЙ В. В., КЛЕПІКОВ В. Ф., ЛИТВИНЕНКО В. В.** Застосування електромагнітної активності при термографічному контролі дефектів та структурних неоднорідностей в феромагнітних матеріалах 50

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

Founders: The National Academy of Sciences of Ukraine, The E. O. Paton Electric Welding Institute of NASU, International Association «Welding» (Publisher)

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. PATON

O. I. Boichuk, E. F. Garf, E. A. Davydov,
A. T. Zelnichenko, L. M. Lobanov,
Z. A. Maidan (Executive Secretary)

A. Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),
Yu. N. Posypaiko,

V. A. Troitskii (Deputy Editor-in-Chief),
E. V. Shapovalov

PWI of the NASU, Kiev, Ukraine

V. A. Stryzhalo

Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine

N. P. Aleshin

N.E.Bauman MSTU, Moscow, RF

V. L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus

L. M. Kazakevich

Institute of Physical-Chemistry, Kiev, Ukraine

O. M. Karpash

Ivano-Frankovsk National Technical Institute of Oil
and Gas, Ukraine

V. V. Kluev

CJOSC NIIIB MNPO «Spektr», Moscow, RF

Z. T. Nazarchuk, V. N. Uchanin

Physico-Mechanical Institute, Lvov, Ukraine

N. V. Novikov

Institute for Superhard Materials, Kiev, Ukraine

G. I. Prokopenko

Institute of Metal Physics, Kiev, Ukraine

V. A. Storozhenko

Kharkov National University of Radioelectronics,
Ukraine

S. F. Fomichev

KPI National Technical University of Ukraine, Kiev

M. G. Chausov

National University of Bioresources and Nature
Management of Ukraine, Kiev

V. E. Sherbinin

IMF UrD RAS, Ekaterinburg, RF

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

Scientific editors

E. A. Davydov, L. F. Kharchenko

Editors

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda, T. V. Ushtina

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001.
All rights reserved.

«Tekhnicheskaya diagnostika
i nerazrushayushchiy kontrol»
journal is republished cover-to-cover in English
under the title of «Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing» by Cambridge
International Science Publishing, UK.

CONTENT

SCIENTIFIC-TECHNICAL

PATON B. E., LOBANOV L. M, NEDOSEKA A. Ya., OVSIIENKO M. A., YAREMENKO M. A., GEREB Ya., VARGA L., FEDCHUN A. Yu., ELKIN A. A., OBODOVSKII B. M., KRAEVSKII V. N., VASILIEV A. S., KUSHNIRENKO S. A. Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis) 3

LOBANOV L. M., ZNOVA V. A., PIVTORAK V. A., KIYANETS I. V. Diagnostic of composite elements of aircraft structures by electron shearography method 19

GUDRAMOVICH V. S., REPRINTSEV A. V., RYABOKON S. A., SAMARSKAYA E. V. Evaluation of life of structures of rocket-space equipment taking into account the effect of stress concentrators in form of holes28

SHAPOVALOV E. V., KOLYADA V. A., LUTSENKO N. F., MANGOLD A. N. Automated control of technical state of wheel pairs, of cars during car movement 37

BARVINKO A. Yu., BARVINKO Yu. P. On possibility of prevention of avalanche-like fractures of the wall of cylindrical tanks for oil storage by application of sheet steel with increased values of impact toughness 44

BAZALEEV M. I., BRYUKHOVETSKII V. V., KLEPIKOV V. F., LITVINENKO V. V. Application of electromagnetic activation in thermographic control of defects and structural inhomogeneities in ferromagnetic materials 50

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing» TC-78

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ (АЭ ТЕХНОЛОГИЯ И КОНТРОЛИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ЕЕ ОСНОВЕ)

**Б. Е. ПАТОН¹, Л. М. ЛОБАНОВ¹, А. Я. НЕДОСЕКА¹, С. А. НЕДОСЕКА¹, М. А. ОВСИЕНКО¹,
М.А. ЯРЕМЕНКО¹, Я. ГЕРЕБ², Л. ВАРГА², А. Ю. ФЕДЧУН³, А. А. ЕЛКИН³, Б. М. ОБODOВСКИЙ³,
В. Н. КРАЕВСКИЙ³, А. С. ВАСИЛЬЕВ³, С. А. КУШНИРЕНКО³**

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев–150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Венгрия. ³Одесский припортовый завод. 65000, Одесская обл., г. Южный, ул. Заводская, 3.

E-mail: otn_boss@opz.odessa.ua

Практика эксплуатации машин, конструкций и сооружений все настойчивее требует создания методов и средств, с помощью которых можно было бы определять на основании имеющихся данных их функциональные возможности в любой момент времени, как в прошлом, так и в настоящем, а также прогнозировать на базе этих данных их состояние и поведение в будущем. Как правило, расчетным путем трудно оценить, как именно и при каких значениях параметров, характеризующих работоспособность конструкции, начнется разрушение. Существующего объема знаний о зависимости принимаемых критериев разрушения от многочисленных параметров чаще всего недостаточно. Если учесть, что могут иметь место и такие, влияющие на исчерпание несущих свойств материалов, параметры эксплуатации, о которых просто ничего неизвестно, то сложно оценить точность расчета, и в некоторых случаях погрешность может оказаться недопустимо высокой. Технология контроля на основе акустической эмиссии дает возможность получить более высокую точность оценок, определяемую лишь точностью приборов и методик их применения в каждом конкретном случае. Ее применение позволяет осуществить переход от наблюдения за состоянием конструкций к управлению их безопасной эксплуатацией. Библиогр. 56, рис. 15.

Стремительное развитие науки и технологий дает перспективу широкого применения акустической эмиссии для создания интеллектуальных конструкций и сооружений, которые с заданной точностью и вероятностью сами будут сообщать о своем состоянии и предлагать меры выхода из затруднительных ситуаций.

Академик Б.Е. Патон

Обеспечение безопасности конструкции начинается задолго до пуска ее в эксплуатацию [1–56]. На первой стадии проводятся расчеты, предварительные испытания, проектно-конструкторские и другие работы, связанные с созданием конструкции. И лишь на второй стадии – стадии эксплуатации – начинают проводить мероприятия по контролю ее состояния, определяют реальный остаточный ресурс конструкции. В данной работе первая стадия не рассматривается, поскольку является задачей специалистов в области прочности, конструкторов и проектировщиков конструкций. На второй стадии, которая наступает после ввода конструкции в эксплуатацию, случайные просчеты в некоторых конструктивных решениях, нарушения технологии изготовления и эксплуатации, влияние внешней среды и длительная работа приводят, как правило, к необратимым процессам накопления повреждений в материалах. При этом в отдельных локальных областях суммарный объем повреждений может

достигнуть критической величины, после чего начинается разрушение. Сказанное определяет основную задачу технической диагностики – создание технологии определения и прогнозирования состояния материалов конструкций в процессе их испытаний или эксплуатации. Опыт показывает, что наиболее вероятными причинами отказов и аварий являются либо дефекты в исходном материале, из которого изготовлены конструкции, либо вторичные – технологические и эксплуатационные – дефекты, появившиеся в нем в процессе производства конструкций или их ремонта и развившиеся до недопустимых размеров при эксплуатации, либо и те, и другие, проявляющиеся в зависимости от величины нагрузок, действующих на различных этапах деформирования материалов. В некоторых случаях причиной разрушения может стать нарушение условий эксплуатации. Дефекты, возникающие в процессе изготовления конструкций или их ремонта, достаточно жестко контролируются как

на стадии технологического контроля, так и в процессе эксплуатации. Результаты контроля оцениваются по существующим нормативным документам, регламентирующим допустимость тех или иных дефектов. Обнаружение недопустимых дефектов приводит либо к необходимости их устранения, либо к отбраковке конструкции или дефектного узла. Стандартная процедура дефектоскопического контроля достаточно сложна и, как правило, не охватывает объект полностью. Контроль осуществляется выборочно в наиболее проблемных по мнению специалистов местах. В некоторых случаях это может привести к тому, что опасные дефекты не будут обнаружены, а их влияние на несущую способность конструкции и ее безопасную эксплуатацию может быть существенным. Актуальность рассматриваемой проблемы возрастает с увеличением срока эксплуатации, что диктует необходимость поиска более простых и эффективных методов решения задачи оценки состояния материалов эксплуатируемых или подвергающихся испытаниям конструкций.

Как правило, расчетным путем трудно оценить как именно и при каких значениях параметров, характеризующих работоспособность конструкции, начнется разрушение. Существующего объема знаний о зависимости принимаемых критериев разрушения от многочисленных параметров чаще всего недостаточно. Если учесть, что могут иметь место и такие, влияющие на исчерпание несущих свойств материалов, параметры эксплуатации, о которых просто ничего неизвестно, то сложно оценить точность расчета, и в некоторых случаях погрешность может оказаться недопустимо высокой.

К решению этой проблемы можно подойти с другой стороны. Естественно, началу разрушения соответствует вполне определенное неблагоприятное сочетание факторов, приводящих к разрушению. Если не обращать внимание на каждый фактор в отдельности, а только на их неблагоприятное сочетание, то задача резко упрощается и необходимо обнаружить лишь момент начала разрушения. Этот момент можно определить с помощью акустической эмиссии (АЭ), так как каждому этапу разрушения материала будет соответствовать вполне конкретный всплеск акустического излучения – единичный квант излучения, который может быть достаточно просто зафиксирован измерительной аппаратурой и расшифрован на основе соответствующей технологии. Такой подход позволяет совершенно по-новому взглянуть на проблему обеспечения безопасности эксплуатации конструкций. Созданная на такой основе технология контроля дает возможность получить более высокую точность оценок, определяемую лишь точностью приборов и методик их применения в каждом конкретном случае. По-

грешность оценок с вероятностью 95 %, как правило, не превышает $\pm 15\%$. Ниже более подробно рассмотрен пример применения метода контроля на основе АЭ в системах непрерывного мониторинга при оценке состояния материалов промышленных конструкций.

Идея разработки и внедрения систем непрерывного контроля технического состояния объектов химических производств ОАО «Одесский припортовый завод» (ОПЗ) появилась еще в 1990 г. К этому времени строительство и освоение проектных мощностей всех объектов завода было завершено. Основное назначение завода – производство и перегрузка на экспорт химической продукции собственного производства и продукции других химических предприятий Украины и России. В то время в составе завода успешно эксплуатировались два, а позже, в связи с необходимостью расширения объема производства, вызванной экономически выгодными условиям на мировом рынке химической продукции и удачным географическим размещением завода, три крупнотоннажных агрегата производства аммиака, два агрегата производства карбамида, комплексы перегрузки аммиака, карбамида и метанола. В состав комплекса перегрузки аммиака входили четыре крупнотоннажных хранилища общей проектной емкостью до 120 тыс. тонн хранения жидкого аммиака (рис. 1). На этих конструкциях в 2001 г. и начались разработка и внедрение систем непрерывного контроля технического состояния объектов ОПЗ с целью обеспечения их безопасной эксплуатации.

К концу 1980-х годов в обществе сформировалось стремление существенно улучшить экологическое состояние регионов путем закрытия потенциально опасных производств химических предприятий. В Одессе был проведен референдум по вопросу закрытия таких производств на ОПЗ. Учитывая обстоятельства, приведшие к авариям на Чернобыльской АЭС и на Ионавском ОО «Азот» (Литва) с разрушением изотермического хранилища жидкого аммиака емкостью 10 тыс. т, вопрос относительно ОПЗ стал еще более актуальным. Хотя безопасность и надежность работы завода обеспечивались применением современного оборудования и технологий, строгим соблюдением технологических режимов эксплуатации основных производственных агрегатов и перегрузочных комплексов, своевременным проведением капитальных ремонтов и регламентных работ, соблюдением норм и требований охраны труда, на референдуме было принято решение о закрытии опасных производств на ОПЗ.

Администрации завода удалось достичь компромиссного варианта – завод не был закрыт, но заполнение хранилищ жидкого аммиака при-

шлось уменьшить вдвое от проектного, что резко отразилось на ритмичности работы перегрузочного комплекса, привело к сбоям в работе предприятий-поставщиков жидкого аммиака, к простоям суден-аммиакозовозов в ожидании загрузки. Однако и при уменьшенной мощности хранилища оно осталось наибольшим в Европе хранилищем жидкого аммиака, расположенным в 18 км от миллионного города Одессы и в 8 км от г. Южный. Этот факт, а также то, что в акватории Черного моря происходило постоянное движение транспортных судов с грузом жидкого аммиака, требовали более тщательного рассмотрения вопроса об обеспечении безопасной работы ОПЗ.

Возникла необходимость разработать и внедрить такую систему контроля технического состояния технологического оборудования, и в первую очередь крупнотоннажных изотермических хранилищ жидкого аммиака, которая бы давала возможность инструментальными методами вести непрерывный контроль за отсутствием развивающихся дефектов в материале и сварных швах оборудования, выявлять возникающие дефекты, контролировать их развитие, а также одновременно рассчитывать остаточный ресурс безопасной эксплуатации объектов производства и хранения аммиака.

С этой целью был изучен опыт предприятий и организаций Украины, России, Германии, Италии, Финляндии, США и Японии по применению методов неразрушающего контроля и диагностики ответственных промышленных объектов. Наиболее полно подходы к обеспечению надежной и безопасной эксплуатации действующих конструкций и сооружений были разработаны отечественными учеными во главе с Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) в новом научном направлении – диагностика и прогнозирование разрушения конструкций в реальном времени. Нужно было провести необходимые доработки и внедрить разработанную технологию на ОПЗ.

Распознавание процессов, протекающих в материалах при разрушении. Как показали исследования, наиболее эффективной технологией оценки состояния материалов конструкций может считаться технология, основанная на теории распознавания ситуации, складывающейся в материале в процессе накопления повреждений и развития разрушения. Такой подход свободен от преобладающего вклада произвольных физических постоянных материала в решение рассматриваемой задачи.

Решение же стало возможным с появлением метода и аппаратуры АЭ и современных достижений в области электроники, вычислительной техники и информационных технологий. Так, разработанная в ИЭС совместно с венгерскими специалистами диагностическая система ЕМА-3

реализовала алгоритм, позволяющий определить разрушающую нагрузку материалов конструкций уже при незначительном уровне текущей. В зависимости от марки материала этот уровень может составлять от 20 % уровня разрушающей нагрузки. Кроме того, анализируя состояние материала и имея в базе данных информацию по исходному уровню этого состояния, система дает оценку остаточного ресурса конструкции. Это существенный шаг вперед.

На рис. 2, а на экране монитора системы ЕМА-3 показаны три изображения, формируемые в процессе эксплуатации конструкции. Интересно отметить наличие прямоугольных сигнальных индикаторов, меняющих цвет последовательно от зеленого до красного, расположенных в верхнем левом углу экрана и информирующих оператора об этапах развития разрушения и их опасности для контролируемой конструкции (рис. 2, б). На сигнальных индикаторах в строке «Прогноз разрушения» приводится диапазон предполагаемых разрушающих нагрузок, рассчитываемых уже на первых стадиях нагружения конструкции и при каждом последующем предупреждении. Продолжение нагружения позволяет системе набрать достаточный объем информации для уточнения величины разрушающей нагрузки и расчета остаточного ресурса материала. Для большей наглядности на экран монитора выводятся предупреждения об опасности дальнейшего нагружения конструкции в соответствии с таблицей (рис. 2, б).

Таким образом, система ЕМА-3 позволяет ответить на основные интересующие вопросы:

- 1) при какой нагрузке произойдет разрушение конструкции;
- 2) как долго конструкция сохранит работоспособное состояние с дефектами, обнаруженными на момент контроля.

Работа математического и соответствующего программного обеспечения систем такого плана базируется на принципах теории распознавания образа, когда признаки протекающих в материалах процессов разрушения формируются в *вектор состояния материала* (ВСМ). Дальнейшее его сравнение с обучающим вектором и корректировка обоих в процессе пополнения решающего модуля дополнительной информацией позволяют сформировать решение системы о состоянии материала конструкции и прогнозировать это состояние на период времени, в течение которого конструкция сохранит свою работоспособность (рис. 3).

Простая схема распознавания состояния материалов содержит два основных блока – датчик и классификатор.

Датчик представляет собой устройство, преобразующее физические характеристики протекающих в объекте процессов в наборы признаков, характеризующих эти процессы. В нашем случае такими признаками являются сигналы АЭ, сопровождающие локальные перестройки структуры материала конструкции, а также внешние условия, вызывающие эти перестройки. В результате измерений получают АЭ, а также низкочастотную (НЧ) технологическую информацию, которая обрывает в совокупности ВСМ:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)',$$

где n – число измеренных характеристик распознаваемого процесса.

Разработанная аппаратура позволяет с заданной точностью получить следующие параметры АЭ: амплитуды сигналов, число срабатываний и событий, энергию события, время нарастания сигнала, длительность нормированного события, число осцилляций в сигнале и событии, частотные характеристики возникающей в материале АЭ. В ВСМ входят также температура контролируемого материала, параметры напряженного состояния контролируемых узлов и некоторые производные от указанных параметров, необходимые для комплектования полного вектора.

Классификатор представляет собой устройство, относящее каждый поступающий на его вход допустимый набор ВСМ к одному из конечного числа классов. При этом предполагается, что ВСМ \mathbf{x} принадлежит одному из M классов образов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$, характеризующих различные этапы процесса разрушения материала.

В общем случае можно принять допущение о том, что априорные вероятности появления объектов каждого класса одинаковы, т.е. ВСМ \mathbf{x} может с равной вероятностью относиться как к одному, так и к другому классу. В таком случае вероятность того, что на самом деле ВСМ \mathbf{x} принадлежит, например, классу ω_j , определяется выражением:

$$p_j = \frac{p(\mathbf{x} | \omega_j)}{\sum_{k=1}^M p(\mathbf{x} | \omega_k)}$$

Решающая функция представляет собой функцию $d(\mathbf{x})$, относящую ВСМ \mathbf{x} к одному из M заданных классов. Оптимальной считается функция $d^0(\mathbf{x})$, которая относит набор ВСМ \mathbf{x} к классу ω_i в том и только в том случае, когда выполняется неравенство

$$p(\mathbf{x} | \omega_i) > p(\mathbf{x} | \omega_j), j \neq i,$$

или

$$\frac{p(\mathbf{x} | \omega_i)}{p(\mathbf{x} | \omega_j)} > 1, j \neq i.$$

Теперь допустим, что измеренные значения ВСМ распределены нормально и соответствующие им ковариационные матрицы имеют вид:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix},$$

где c_{ij} – ковариация i -й и j -й компонент ВСМ; c_{ii} – дисперсия i -й компоненты ВСМ.

Поскольку для нормального распределения в n -мерном пространстве можно записать

$$p(\mathbf{x} | \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{2n} |\mathbf{C}|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i) \right],$$

где \mathbf{x} – вектор состояния материала; \mathbf{m}_i – вектор математического ожидания, отношение двух плотностей распределения $p(\mathbf{x} | \omega_i)$ и $p(\mathbf{x} | \omega_j)$ определяется выражением:

$$\frac{p(\mathbf{x} | \omega_i)}{p(\mathbf{x} | \omega_j)} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[(\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i) - (\mathbf{x} - \mathbf{m}_j)' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_j) \right] \right\}.$$

Так как ковариационная матрица симметрична, данное выражение можно существенно упростить:

$$\frac{p(\mathbf{x} | \omega_i)}{p(\mathbf{x} | \omega_j)} = \exp \left[\mathbf{x}' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) - \frac{1}{2} (\mathbf{m}_i + \mathbf{m}_j)' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) \right].$$

Введем характеристику правдоподобия распознавания процессов, протекающих при разрушении материалов:

$$r_{ij} = \ln \frac{p(\mathbf{x} | \omega_i)}{p(\mathbf{x} | \omega_j)}.$$

Тогда для разделяющей функции получим выражение:

$$r_{ij}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) - \frac{1}{2} (\mathbf{m}_i + \mathbf{m}_j)' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j).$$

Для определения оптимальной разделяющей функции необходимо вычислить значения функции $r_{ij}(\mathbf{x})$ для всех i и j ($i \neq j$) и выбрать наибольшее из полученных значений. Если окажется, что этот максимум равен r_{kj} , то ВСМ \mathbf{x} относим к классу ω_k .

Отметим, что уравнение

$$\mathbf{x}' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) - \frac{1}{2} (\mathbf{m}_i + \mathbf{m}_j)' \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) = 0$$

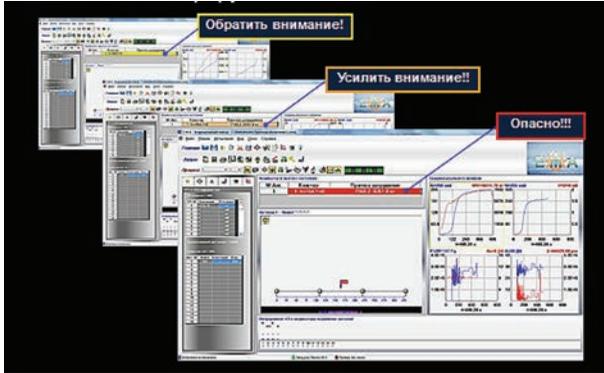
описывает гиперплоскость, проведенную в n -мерном пространстве и разделяющую его на части в соответствии с принадлежностью ВСМ к тому или



Рис. 1. Хранилища аммиака ОПЗ



Рис. 3. Функциональная схема адаптивной системы распознавания образа при оценке состояния конструкций



а

Показания индикатора в левом верхнем углу дисплея	Действия персонала
	Штатный режим эксплуатации
	Первое предупреждение Внимание! При появлении прогнозируемого разрушающего давления и превышении его над рабочим более чем на 50% – продолжить эксплуатацию
	Второе предупреждение При превышении прогнозируемого разрушающего давления над рабочим на 50% и менее – остановить эксплуатацию
	Аварийная ситуация Остановить эксплуатацию! После появления продолжительного прерывающегося звукового сигнала – срочный сброс нагрузки

б
Рис. 2. Индикация на мониторе контролирующего оборудования с представлением главных параметров, характеризующих состояние материала хранилищ (а); таблица действий персонала при различных состояниях материала в процессе эксплуатации (б)



Рис. 4. Приборы ЕМА-4 нового поколения на базе четырехканальных и 16-канальных модулей АЕД-404, АЕД-416

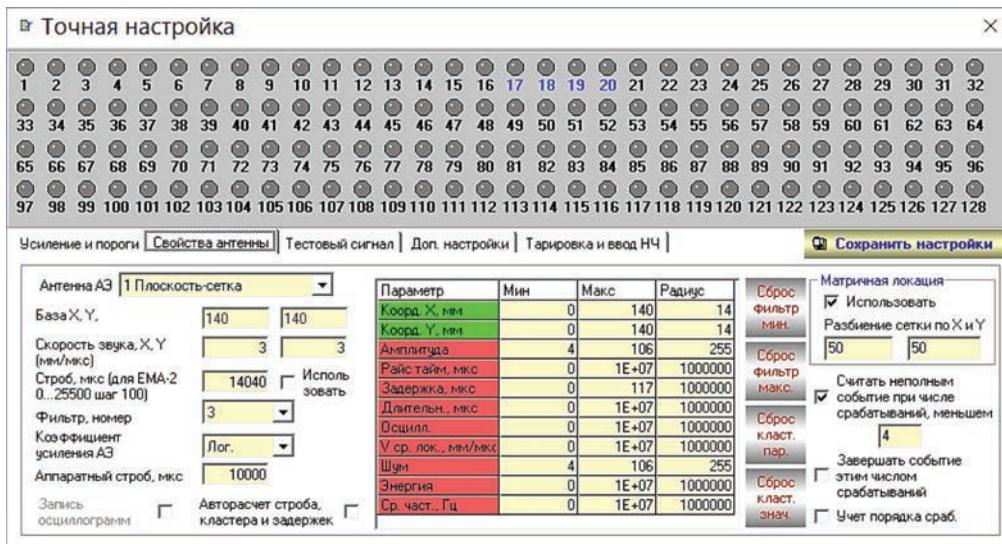


Рис. 5. Задание свойств антенны в окне точной настройки программы ЕМА-3.9 (в центральной части окна – таблица с задаваемыми параметрами фильтрации и кластеризации; в верхней части – индикаторы АЭ активности по 128 каналам АЭ)

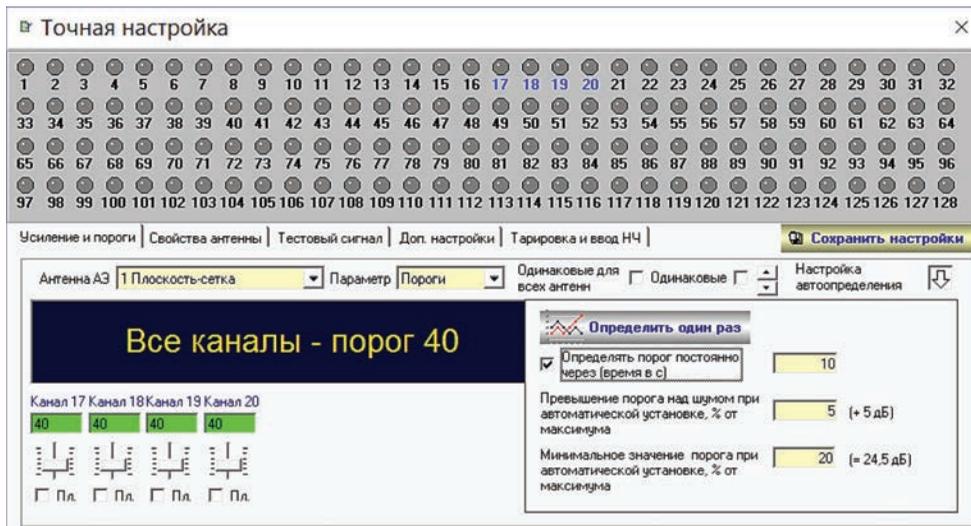


Рис. 6. Задание параметров автоматического определения порогов в окне точной настройки программы EMA-3.9 (справа внизу)

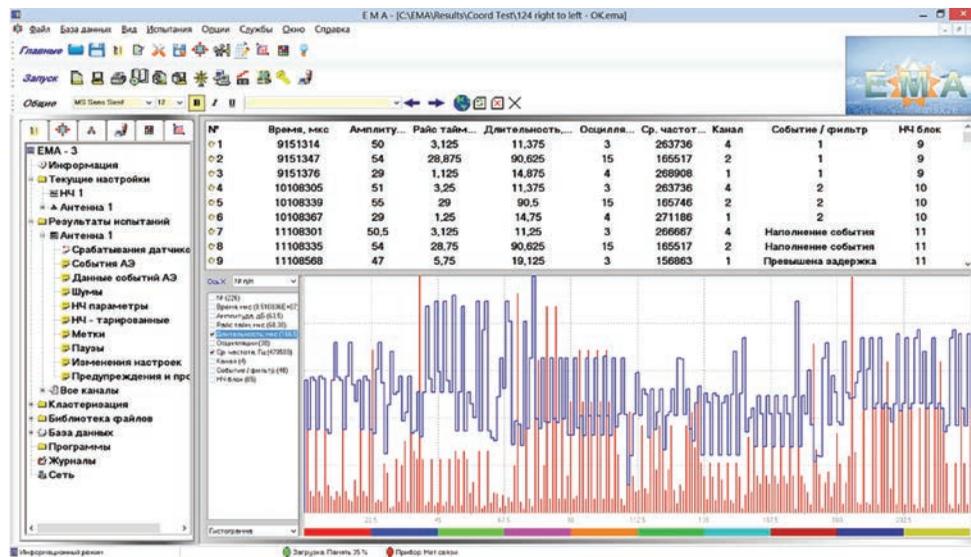


Рис. 7. Окно информации программы EMA-3.9 с данными о срабатываниях датчиков (в нижней части окна – график, где в качестве отображаемых параметров выбраны длительность срабатывания и средняя частота)

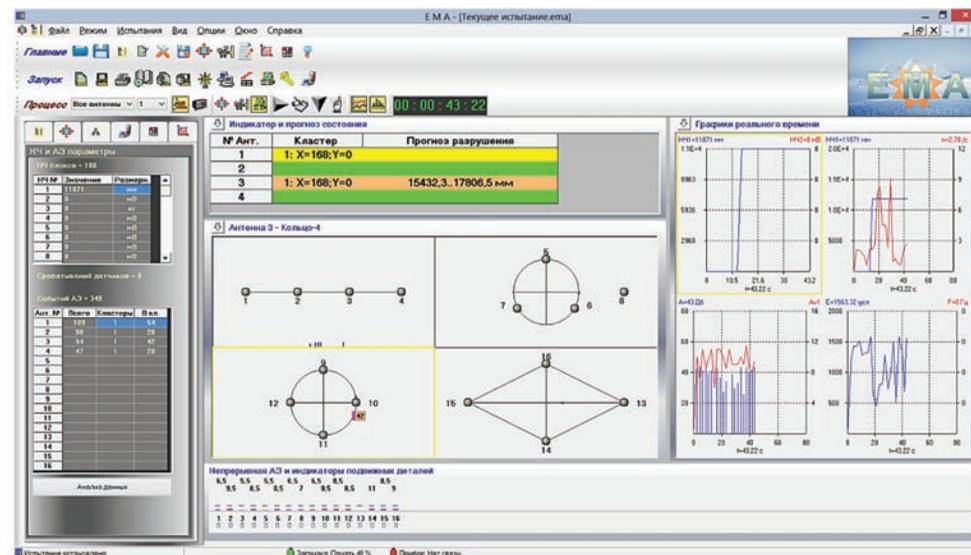


Рис. 8. Окно испытаний программы EMA-3.9 с отображением четырех локационных антенн (экран 1): над экраном локации – область прогноза разрушения, слева – таблицы АЭ и НЧ данных, справа – графики реального времени, под экраном локации – значение непрерывной эмиссии



Рис. 9. Окно анализа данных программы EMA-3.9 с графиками распределений данных АЭ по каналам (экран 2)

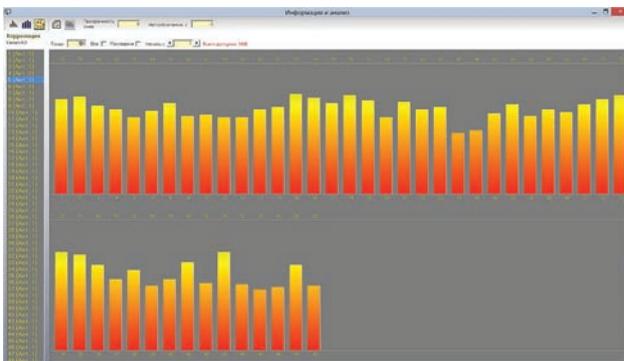


Рис. 10. Окно анализа данных программы EMA-3.9 с графиками корреляции шумов по каналам

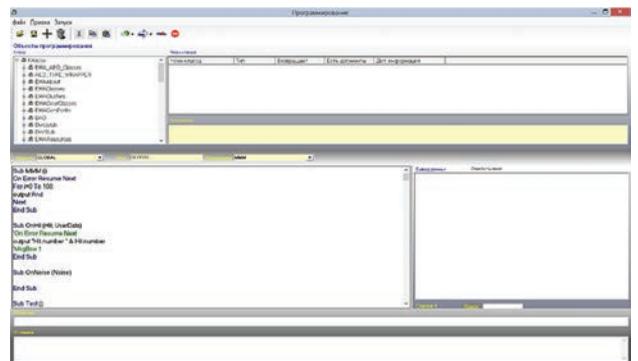


Рис. 11. Окно программирования программы EMA-3.9 (вверху – браузер объектов, слева – редактор кода, справа – окно вывода, внизу – командная строка и окно отладки)

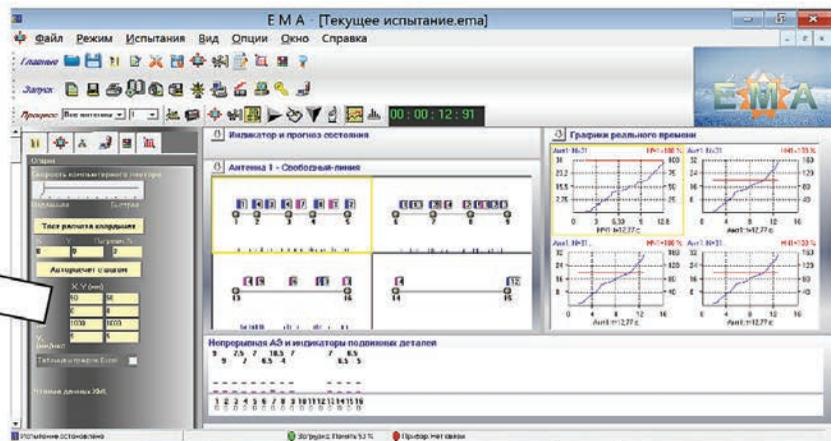


Рис. 12. Окно испытаний программы EMA-3.9 с элементами управления виртуальным тестированием погрешностей определения координат

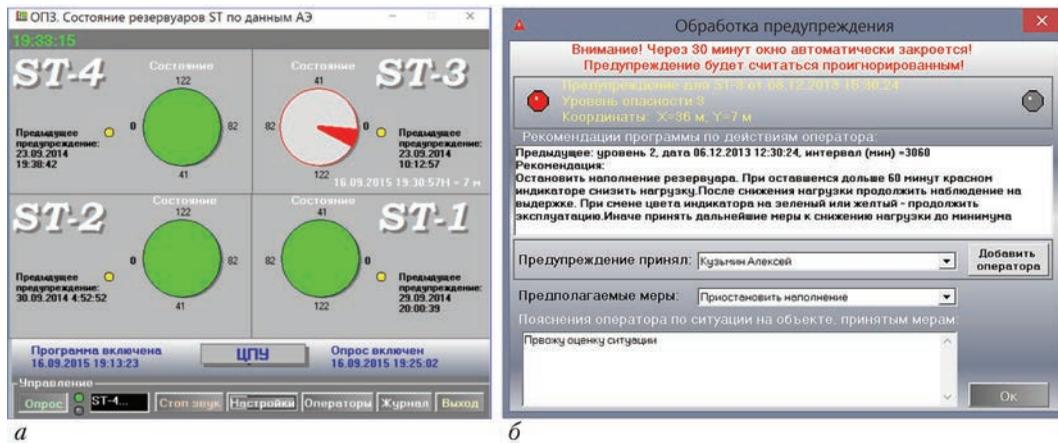


Рис. 13. Интерфейс пользователя индикаторной программы для операторов при контроле состояния хранилищ жидкого аммиака ОПЗ: а – окно с индикаторами опасности состояния (правый верхний индикатор показывает предупреждение 3-го уровня «Опасно» для одного из секторов объекта контроля); б – окно для обработки предупреждений оператором, содержит рекомендацию «Нормированный интеллектуальный совет»



Рис. 14. Окно журнала принятых предупреждений: а – после заполнения данных оператором; б – в случае автосохранения текущего предупреждения при поступлении нового

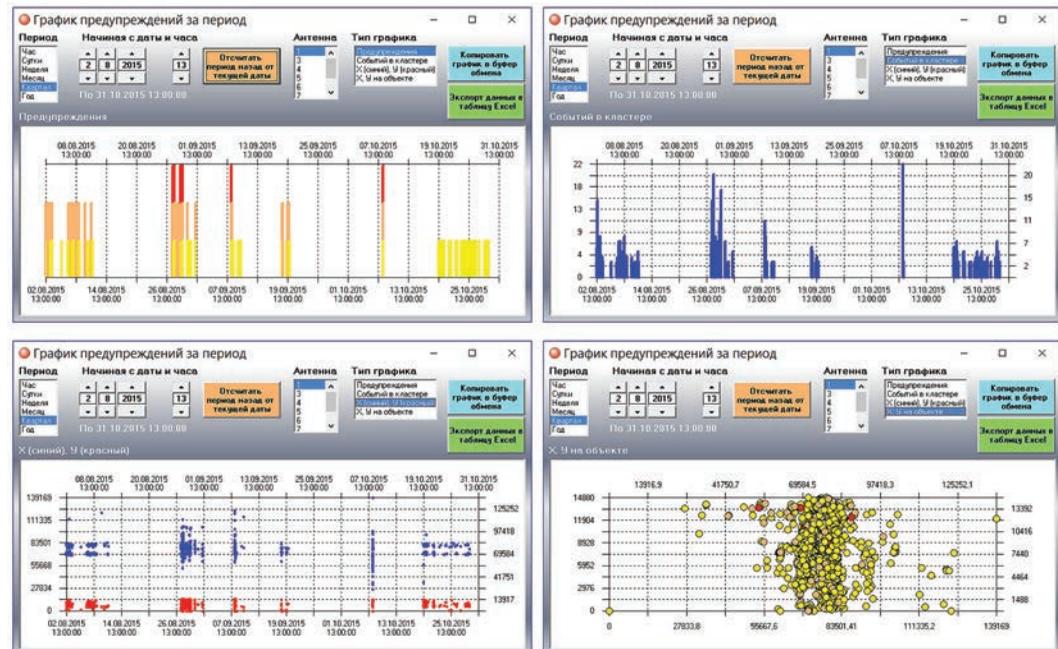


Рис. 15. Окно статистики предупреждений программы ЕМА-3.91 с различными типами графиков

инному критериальному классу. Решая это уравнение, всякий раз получаем разделение двух классов – измеренного ВСМ и эталонного, определяющего этап разрушения материала конструкции.

Приборы и программы, реализующие АЭ технологию. С целью реализации представлен-

ной выше технологии разработаны приборы и специальное программное обеспечение (ПО), позволяющее получить необходимую для дальнейшего анализа информацию и применить на ее основе теорию распознавания состояния конструкции в текущий момент и его прогнозирова-

ния на определенный промежуток времени. Применение современной измерительной аппаратуры и мощной компьютерной техники позволяют реализовать с помощью этого ПО передовую информационную АЭ технологию и обеспечить ее эффективную работу. Рассмотрим более подробно эти вопросы.

Обзорные материалы по ПО систем АЭ диагностики ЕМА впервые были опубликованы в 2005 г. [20]. В частности, описаны базовые возможности ПО относительно прогнозирования разрушающих нагрузок и остаточного ресурса. Уже к тому времени технические характеристики контролирующего оборудования и ПО, включая прогноз, были подтверждены службой ЦСМ Госстандарта Украины. За это время на базе опыта практического применения систем, взаимодействия с пользователями и учета мирового опыта последовательно выполнялись модернизация и расширение возможностей ПО.

При создании новых программ, расширении возможностей существующей версии программы, кардинальной смене базовых возможностей и их визуального представления в программе номер версии изменяется. В публикациях [21, 22, 33] рассмотрены наиболее важные особенности программы ЕМА версии 3.9 и сопутствующих дополнительных программ, используемых при периодическом контроле и непрерывном мониторинге промышленных объектов.

Отметим, что программа ЕМА-3.9, как и предшествующие версии, разработана в среде Microsoft Visual Studio 6 по требованиям Windows SDK, что обеспечивает ее работоспособность на базе всех существующих 32-разрядных операционных систем Microsoft для ПК начиная с Windows 95 и заканчивая Windows 10, а также на 64-разрядных. Программа является аппаратно-независимой и позволяет использовать измерительные АЭ системы различных производителей. Также предусмотрен так называемый пакетный режим обработки данных, что позволяет анализировать любые совместимые по формату данные, полученные с применением данного или стороннего ПО на АЭ системах различных типов.

Нумерация версии 3.9 выбрана исходя из сообщения, что оборудование АЭ диагностики 4-го поколения в данный момент находится в стадии окончательных доработок и тестирования. После полной интеграции ПО с указанным оборудованием модернизированная программа получит новый индекс. Выполненные после представления ЕМА-3.5 в 2005 г. усовершенствования и доработки позволяют говорить о принципиально новом программном продукте, поскольку изменились многие наиболее важные внутренние алгорит-

мы обработки данных и их внешнее визуальное представление.

С развитием сети Интернет стало возможным решение задачи дистанционного управления системами мониторинга, оценки состояния эксплуатирующихся конструкций на расстоянии и оперативного принятия решения в случае возникновения опасных ситуаций. Более чем десятилетний опыт эксплуатации диагностических систем с такими возможностями показал, что на их основе можно приступить к выполнению следующего этапа работ в области обеспечения безопасности конструкций – этапа управления их эксплуатационными параметрами. Первичным в цепи этапов обеспечения надежности конструкций и оборудования в процессе эксплуатации является их непрерывный мониторинг, получение непрерывного потока информации об их состоянии.

В работе [22] детально изложены требования к системам АЭ мониторинга, которые должны входить в состав программно-аппаратного комплекса, управляющего эксплуатацией промышленных объектов на основании данных об их состоянии, получаемых при мониторинге. С учетом этих требований разработано и в данный момент тестируется, в том числе на ОПЗ, новое, четвертое поколение приборов семейства ЕМА, разработанное, как и предыдущее, совместно со специалистами из Венгрии, имеющими в данном вопросе богатый опыт, полученный в течение десятков лет.

Новые разработки АЭ аппаратуры включают самые последние достижения в области электроники и вычислительной техники. Приборы имеют меньшие размеры и массу, поддерживают новейшие современные интерфейсы передачи данных и характеризуются повышенной надежностью за счет отсутствия подвижных компонентов. Увеличилась гибкость систем, создаваемых на основе соединения нескольких приборов. Ранее число совместно работающих измерительных модулей составляло не более двух, с максимальным общим числом каналов не более 64. Сейчас два основных типа приборов, имеющих соответственно 4 и 16 каналов АЭ (рис. 4), могут быть соединены в любой последовательности, а общее число одновременно обрабатываемых каналов АЭ увеличено до 128, аналогично увеличено число НЧ каналов, передающих технологическую информацию.

Программное обеспечение систем ЕМА-3.9 было доработано для взаимодействия с новым типом оборудования. Для этого реализован программный интерфейс для сетевого соединения с приборами, получения от них диагностической информации и отправки управляющих команд. Поскольку изначально программы ЕМА предназначались для обработки данных не более 64 каналов

АЭ и 16 НЧ каналов, потребовались изменения внутренней структуры обрабатываемой информации и формата используемых файлов с параллельной оптимизацией памяти, занимаемой передаваемыми и сохраняемыми блоками информации.

Пользовательский интерфейс также переработан применительно к возможности отображать данные от каждого АЭ и НЧ канала, выполнять их выбор в алгоритмах первичной или дополнительной обработки, настраивать и конфигурировать совместную работу каналов в составе сложных локационных антенн.

Таким образом, после представления в 2013 г. программы ЕМА-3.9 выполнена ее фундаментальная модернизация. Новый программный продукт получил наименование ЕМА-3.91.

Ниже представлены основные особенности программ ЕМА-3.9 и ЕМА-3.91, обеспечивающие новые возможности в обработке диагностической информации и переходе к управлению эксплуатацией промышленных объектов.

В программе ЕМА-3.9 объединены интерфейсы настройки процессов кластеризации и фильтрации АЭ данных. Созданный алгоритм кластеризации позволяет выбрать любую комбинацию следующих признаков, характеризующих сигнал АЭ: координату, амплитуду, время нарастания, длительность, число осцилляций, скорость, частота, энергия, уровень шума. Это дало возможность более детального проведения классификации обнаруженных дефектов и анализа АЭ информации в целом. Полученные события АЭ можно фильтровать по тем же признакам, по которым проводится их кластеризация.

Критерии фильтрации параметров задаются минимальным и максимальным значениями. Совместное использование нескольких полос фильтрации и объединения по требуемым параметрам в кластеры обеспечивает более эффективную отбраковку технологических шумов и детальный анализ информации. Программа обеспечивает выбор между фильтрацией параметров на входе с отсечением ненужной информации и фильтрацией, выполняемой после формирования событий. Применение этих алгоритмов на практике показало, что полезными являются обе возможности, но первой следует отдать предпочтение, поскольку сокращается, иногда весьма существенно, объем сохраняемых и обрабатываемых данных.

Локация на основе матрицы задержек позволяет минимизировать ошибки и исключить попадание координат событий в недопустимую область. Создание матрицы происходит на основе заранее определенной скорости распространения звука в материале, при изменении заданной скорости происходит автоматический пересчет ма-

трицы, на основе которой затем определяются координаты событий АЭ.

Окна настройки программы ЕМА-3.91 содержат новый интерфейс с общей таблицей ввода параметров для кластеризации и фильтрации (рис. 5). Изменения можно выполнять в реальном времени как при настройке, так и при проведении натурных испытаний или непрерывного АЭ мониторинга.

Вкладка «Свойства антенны» позволяет установить полосовые цифровые фильтры для таких параметров событий АЭ, как длительность, число осцилляций, время нарастания сигнала до максимума, амплитуда АЭ, средняя частота сигнала и др. Устанавливают верхнюю и нижнюю границы полосы. Если локационная антенна АЭ поддерживает режим матричной локации (для линейных, плоскостных и цилиндрических антенн), в окне можно изменять параметры матрицы в реальном времени.

Одной из особенностей ПО систем ЕМА является работа не только с акустической, но и технологической информацией, которая вводится в систему в виде НЧ параметров: нагрузки, давления, деформации, температуры и т.д. Осуществлена возможность настройки коэффициентов и тарировочных функций непосредственно в процессе проведения измерений. Изменения отображаются на графиках реального времени, что позволяет быстро подобрать необходимый вид тарировки. Кроме того, в случае невозможности введения в систему какого-то из НЧ параметров электрическим или программным способом предусмотрен ручной ввод и экстраполяция НЧ. Добавлена возможность ввода текущего значения низкочастотных параметров и обратной их экстраполяции в процессе проведения измерений. Это позволяет получить ступенчатую или представленную наклонными отрезками кривую изменения низкочастотного параметра, например, текущего давления.

Реализована возможность автоматической коррекции установленных порогов амплитудной дискриминации через заданное время (рис. 6). Указанная доработка очень важна для автономной работы системы во время мониторинга, так как позволяет вовремя реагировать на изменения акустического фона без вмешательства оператора.

Окно информации (рис. 7) содержит график, который отображает табличные данные из списка окна информации. При выборе другого содержания списка график автоматически обновляется. Каждый из представленных в списке параметров может быть представлен на графике или отключен. Имеется выбор типа графика – точечный, столбчатый, линейный, ступенчатый. Положение графика и его размер являются настраиваемыми.

Каждое срабатывание датчика при табличном анализе содержит информацию о событиях АЭ, к

которым оно было отнесено (если срабатывание не было отнесено ни к одному событию, то указываются признаки, по которым произошла отбраковка). В случае отбраковки событий в соответствующей таблице указываются критерии, по которым она проводилась. Рассмотренные возможности позволяют существенно расширить информативность системы и проводить сложный комплексный анализ полученных данных. Кроме того, допущенные оператором при настройке системы ошибки могут быть легко обнаружены и исправлены.

Экран локации (рис. 8) обеспечивает вывод как всех используемых при проведении АЭ контролей локационных антенн одновременно, так и по желанию пользователя нужной антенны. Для повышения наглядности в местах формирования АЭ событий появляется вспышка.

В программе используются дополнительные способы анализа данных в графическом виде – распределения значений параметров АЭ по каналам и корреляции между каналами. Окно анализа данных (рис. 9, 10) предназначено для просмотра и дополнительного анализа получаемых АЭ данных, в том числе с возможностью автоматического обновления в реальном времени. Экран 1 (рис. 8) содержит данные по кластерам и во многом аналогичен данным в окне информации; он позволяет просмотреть по кластерам выбранной антенны данные событий АЭ и относящихся к ним срабатываний датчиков. Экран 2 (рис. 9) позволяет выбирать и сравнивать данные по отдельным каналам АЭ в виде распределения параметров.

Для графиков предусмотрен выбор типа графика (столбчатый или ступенчатый), отображение-скрытие сетки.

Экран 3 (рис. 10) отображает столбчатый график корреляции заданного числа данных непрерывной АЭ для выбранного канала с остальными каналами.

Опыт эксплуатации систем ЕМА на производстве, в том числе в режиме непрерывного мониторинга, показал, что одной из наиболее важных задач является автоматизация повторяющихся и трудоемких операций. Ряд представленных выше программных средств решает некоторые частные вопросы автоматизации. К сожалению, далеко не всегда очевидно заранее, какие именно операции придется автоматизировать, исходя из разнообразия объектов контроля, условий их эксплуатации и возникающих пожеланий персонала, эксплуатирующего системы.

В связи с этим программа ЕМА версии 3.9 оснащена встроенной системой программирования на языке VBScript (рис. 11), который соответствует спецификации, созданной компанией Microsoft.

Реализована возможность дополнительного анализа обрабатываемых данных или же полностью альтернативной их обработки. В частности, можно полностью изменить механизм формирования событий, расчета их координат, особенности вывода на экран, табличного и графического представления и т.д. Это не только расширяет функциональность программы, но и дает возможность экспериментировать с обработкой данных, расширяя накопленный научный и практический опыт, который, несомненно, пригодится при создании последующих версий ПО.

Отметим, что ряд перечисленных выше разработок и модернизаций является результатом тесного взаимодействия разработчиков систем АЭ контроля и мониторинга различных модификаций с их пользователями, выполнения совместных исследований и анализа возникших при этом замечаний и предложений.

С применением новых возможностей в 2015 г. выполнен анализ и оптимизация используемых в программе способов и алгоритмов локации координат источников АЭ [22]. Переход к контролю объектов со сложной геометрией, особенно при произвольной расстановке датчиков АЭ, потребовал быстрой и оперативной оценки возможных погрешностей при локации источников АЭ. Ранее такая оценка проводилась непосредственно на объекте экспериментальным путем после расстановки датчиков с использованием импульсного прозвучивания от специального генератора или методом Су-Нильсена, основанном на сломе графитового стержня. В ПО ЕМА проверка выполняется при помощи автоматизированного программного, виртуального тестирования погрешностей локации для заранее задаваемых конфигураций локационных антенн (рис. 12). Несомненным преимуществом такого способа проверки является то, что ее можно выполнить очень быстро, причем до начала физической расстановки датчиков на объекте. Таким образом подбираются оптимальная схема размещения датчиков и наиболее подходящий алгоритм расчета координат источников АЭ.

Разработанная система тестирования точности локации источников АЭ позволила существенно упростить и сократить по времени процесс настройки АЭ испытаний, а также заранее оценивать достоверность расположения обнаруженных при реальных измерениях источников АЭ на определенных участках объекта контроля. Созданная программа позволяет оценить диапазон скоростей звуковых волн для выбора оптимального варианта, который следует использовать при локации, что существенно повышает ее точность.

При помощи виртуального тестирования существующие и вновь создаваемые алгоритмы лока-

ции источников АЭ могут быть быстро проверены на предмет точности и наличия ошибок и своевременно откорректированы. Отметим, что по результатам такой проверки алгоритмы локации, созданные для систем ЕМА, были скорректированы или полностью заменены в случаях, когда виртуальное тестирование показало недостаточную их точность.

Разработанные аппаратурные и программные средства дают возможность получать всю необходимую информацию с объекта контроля в качестве исходных данных для работы алгоритма оценки состояния материала конструкции при заданных условиях вероятности оценки и ошибки. В реальном масштабе времени, как уже было сказано, могут быть получены следующие АЭ параметры: амплитуды сигналов АЭ, число срабатываний и событий, энергия события АЭ, время нарастания сигнала АЭ, длительность нормированного события АЭ, число осцилляций в сигнале и событии, частотные характеристики возникающей в материале АЭ. В ВСМ входят также температура контролируемого материала, параметры напряженного состояния контролируемых узлов и некоторые производные от указанных параметров, необходимых для комплектования полного вектора.

Дополнительные средства анализа, представленные выше, позволяют дополнить прогноз, получаемый с использованием ВСМ, расширенными данными о конкретных процессах повреждения и развития разрушения в конструкциях. Отметим, что системы ЕМА четвертого поколения позволяют также проводить анализ осциллограмм сигналов АЭ в реальном времени.

Управление безопасной эксплуатацией и нормированный интеллектуальный совет. Разработанная АЭ технология вводится как составная часть процесса производства, а мониторинг, интегрированный в компьютерную сеть предприятия, дополняет существующие средства отслеживания текущего состояния объектов на производстве. На ОПЗ, учитывая потребности предприятия, руководством была поставлена новая задача – переход от констатации полученных в ходе мониторинга данных к применению их в управлении безопасностью эксплуатации оборудования комплекса перегрузки аммиака. Вместо простой индикации степени опасности текущего состояния было обеспечено предоставление автоматизированных рекомендаций по реагированию на опасность. Это означает более глубокую интеграцию мониторинга в структуру производства, с интеллектуальными средствами для формулирования и принятия решений о возможности дальнейшей эксплуатации и рекомендованных эксплуатационных режимов.

В работе [22] вводится в практическое использование термин «нормированный интеллектуальный совет» (НИС). В контексте задач производства такой совет содержит анализ ситуации на объекте контроля и четкие инструкции по эксплуатации объекта в данной ситуации. В случае возникновения опасности такие инструкции предусматривают остановку нагрузки конструкции или даже, при необходимости, ее частичную или полную разгрузку. Формулировка НИС происходит автоматически и в сжатые сроки (несколько секунд) после возникновения потенциальной угрозы для объекта. Предоставление НИС сопровождается визуальным и звуковым предупреждением об опасности, информацией о степени опасности и конкретного участка объекта контроля, которому опасность угрожает (рис. 13).

Совет формируется в соответствии с таблицей (см. рис. 2, б) на основе анализа не только текущих, но и предшествующих данных о состоянии объекта контроля и учитывает многолетний опыт эксплуатации объектов данного типа и контроля их системами непрерывного АЭ мониторинга. НИС является основой для последующей реализации автоматизированного управления безопасностью. Для практической его реализации потребовался многолетний практический опыт наряду с передовыми компьютерными технологиями.

Журнал принятых предупреждений (рис. 14) ведется программой автоматически, заполняется только в случае, если установлен флажок «Требовать реакции оператора на предупреждение».

При открытии журнала в окне автоматически отображается последняя по дате запись. Для просмотра других записей предусмотрено пролистывание их стрелками «Вперед» и «Назад».

Остальные элементы окна предназначены для вывода данных о предупреждении и его обработке. Они отображают даты получения программой предупреждения и завершения обработки его оператором, данные об уровне опасности и координатах центра акустической активности, рекомендации программы по ситуации и принятые оператором меры.

В правой верхней части окна расположено графическое отображение опасного сектора с указанием сторон света, под ним кнопка запуска графика статистики предупреждений для данного резервуара.

Учитывая, что системы непрерывного мониторинга работают длительное время, периодически генерируя предупреждения об опасности, актуальным является изучение тенденций возникновения опасных ситуаций. Это позволяет сопоставить генерацию определенного предупреждения или их группы с технологическими процессами, параметрами нагрузки, климатическими условия-

ми и т.д. Ранее не было возможности выполнить данный анализ автоматически. Теперь получение статистики мониторинга полностью автоматизировано. Элементы управления позволяют выбрать период времени, за который требуется статистика предупреждений, и построить график, на котором цветом столбца обозначен уровень предупреждения.

Построение графика основано на данных, хранящихся в специальных файлах (журналах). Информация обрабатывается и отображается в окне, показанном на рис. 15. Пользователь может изменить период, за который требуется статистика, выбрав его из списка. Начальная дата выбирается с помощью стрелок, а также при нажатии кнопки, которая позволяет автоматически отчислить отчетный период от текущей календарной даты. Данные графика с помощью специальной кнопки могут быть скопированы в буфер обмена, с целью дальнейшего использования, например, в отчетной документации.

В файлах статистики могут храниться данные для нескольких антенн АЭ, в связи с чем пользователь может выбрать, отображать ли на одном графике данные со всех антенн одновременно или же только с одной.

Данные могут быть представлены на четырех различных типах графиков.

График «Предупреждения» показывает цветом и высотой столбца уровень предупреждения в соответствующий момент времени:

1 предупреждение – желтый цвет, высота столбца 1/3 графика;

2 предупреждение – оранжевый цвет, высота столбца 2/3 графика;

3 предупреждение – красный цвет, высота столбца во весь график;

4 предупреждение с повышенной опасностью – черный цвет, высота столбца во весь график.

Ось ординат на графике отсутствует.

График «Событий в кластере» показывает высотой столбца число событий в кластере при поступлении предупреждения в соответствующий момент времени. График « X (синий), Y (красный)» показывает точками координаты кластеров при поступлении предупреждения в соответствующий момент времени. Шкала по оси ординат соответствует обеим координатам X и Y . Для линейных антенн отображаются только координаты X синим цветом.

График « X , Y на объекте» показывает кружками координаты кластеров при поступлении предупреждения в соответствующий момент времени. Для линейных типов антенн данный график представлен столбцами, высота которых отображает число событий в кластере при получении предупреждения.

Окно статистики предупреждений является масштабируемым и позволяет менять пропорции и размер графика.

Таким образом, на сегодня создана и внедрена на производстве современная информационная технология, позволяющая на основе данных АЭ мониторинга проводить анализ состояния конструкций за длительный период с прогнозом его на будущее, определять с заданной вероятностью нагрузку, при которой произойдет разрушение, и на основе статистики накопленных предупреждений оценивать потенциально опасные участки на объектах контроля.

Автоматизация мониторинга и обработки поступающих данных приводит к постепенному исключению человеческого фактора как из процесса настройки и проведения мониторинга, так и (в последнее время) из процесса принятия решения о состоянии конструкции и необходимых мерах по обеспечению ее безопасности. Это, в свою очередь, служит основой для внедрения, в ближайшей перспективе, системы полностью автоматизированного управления безопасностью, в которой диагностические данные будут использоваться не только для анализа состояния объекта контроля, но и для управления его эксплуатацией.

При возникновении потенциальной опасности разрушения в такой «интеллектуальной конструкции» программное обеспечение выберет оптимальный режим нагружения, подаст команды управляющим механизмам на его обеспечение и проконтролирует их выполнение. Использование такой технологии позволит существенно повысить безопасность эксплуатации и, в большинстве случаев, предотвратить разрушение и возможные катастрофические последствия.

В заключение следует отметить, что:

- стремительное развитие средств контроля конструкций, особенно с применением АЭ технологии, и то внимание, которое уделяется этому вопросу во многих странах мира, дают основание предположить в дальнейшем широкое применение АЭ для создания «интеллектуальных конструкций и сооружений», которые с заданной точностью и вероятностью сами будут сообщать о своем состоянии и предлагать меры выхода из внештатных ситуаций;

- системы непрерывного мониторинга, использующие интегральные методы контроля и, в частности, метод АЭ, будут все шире применяться при контроле сначала опасных в эксплуатации, а затем и в обычных промышленных конструкциях;

- следует ожидать расширения сети специализированных центров контроля эксплуатирующихся конструкций. Такие центры будут укомплектованы специалистами высокой квали-

фикации, а современные цифровые технологии и средства коммуникации позволят им проводить мониторинг и оценивать состояние конструкций дистанционно, находясь от объекта контроля на любом расстоянии. Контроль из трудоемкого и неудобного постепенно превращается в более удобный, офисный;

– общемировые тенденции в информационных технологиях позволяют предположить дальнейшую автоматизацию всех существующих процессов контроля состояния конструкций, в том числе АЭ мониторинга. Приоритет будет за технологическими решениями, использующими новейшие тренды в развитии ИТ – распределенные и облачные вычисления, использование быстродействующей дешевой связи, миниатюризацию и унификацию разрабатываемого оборудования, стандартизацию описания данных на основе стандартов HTML и XML.

Выводы

Разработана и постоянно совершенствуется оригинальная методика распознавания и прогнозирования на заданный промежуток времени состояния материала конструкций в процессе их эксплуатации.

Для реализации методики распознавания и прогнозирования разработано с учетом последних достижений в области АЭ контроля и информационных технологий программное обеспечение, позволяющее реализовать ее в реальном времени с использованием современной вычислительной техники.

Разработана новая эффективная аппаратура АЭ, согласованная с алгоритмами распознавания и прогнозирования состояния материала конструкций, и позволяющая эффективно использовать программное обеспечение, реализующее эти алгоритмы.

Основные технические характеристики контролирующего оборудования подтверждены службой ЦСМ Госстандарта Украины.

Разработанные технология контроля и оборудование в режиме непрерывного мониторинга используется при оценке состояния крупногабаритных хранилищ аммиака, технологических трубопроводов и трубопроводов тепловых станций, работающих при температуре до 550 °С.

Выполненные разработки и модификации, включая изменения в обработку данных, интерфейс, информативность и средства автоматизации выполняемых задач позволяют повысить эффективность применения систем АЭ диагностики и расширить сферу перспективных исследований, развить потенциал их промышленного применения.

Полная автоматизация процесса АЭ мониторинга и анализа получаемой информации по-

зволяет перейти от наблюдения за состоянием конструкций к управлению безопасностью их эксплуатации.

1. Алешин Н. П. Новые информационные системы неразрушающего контроля и диагностики сварных конструкций / Н. П. Алешин // Автоматическая сварка. – 2003. – № 9/10. – С. 64–69.
2. Андрейкив А. Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Р. В. Лысак. – К : Наукова думка, 1989. – 176 с.
3. Бигус Г. А. Исследование акустико-эмиссионных сигналов при деформировании и разрушении образцов из стали 22К / Г. А. Бигус, П. Б. Стрелков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 1. – С. 10–15.
4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф в 2 кн. / Р. Гилмор. – М. : Мир, 1984. – Кн. 1. – 350 с. ; Кн. 2. – 285 с.
5. Гренандер У. Лекции по теории образов в 3 т.; Т. 1 Синтез образов / У. Гренандер. – М. : Мир, 1979. – 397 с.
6. Гренандер У. Лекции по теории образов в 3 т.; Т. 2 Анализ образов / У. Гренандер. – М. : Мир, 1981. – 445 с.
7. Гренандер У. Лекции по теории образов в 3 т. Т. 3 Регулярные структуры / У. Гренандер. – М. : Мир, 1983. – 430 с.
8. Анализ риска аварий на магистральном аммиакопроводе «Тольятти–Одесса» ОАО «Трансаммиак» / [Д. В. Дегтярев, Ю. А. Дадонов, И. А. Кручинина и др.] // Труды 7-й Всерос. научн. конф. «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» и 3-я Всерос. научн.–практ. конф. «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», Красноярск, 13–17 окт. 2003 г. – Т. 2. – Ин-т вычисл. моделир. СО РАН, 2003. – С. 102–103.
9. Ковчик С. Е. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения справоч. пособ. в 4 т. / С. Е. Ковчик, Е. М. Морозов ; под общ. ред. акад. НАН Украины В. В. Панасюка. – К. Наукова думка, 1988. – Т. 1. – 436 с.
10. Коллакот Р. Диагностика повреждений / Р. Коллакот. – М. : Мир, 1989. – 516 с.
11. Интегрированная экспертно-аналитическая система оценки, анализа и прогнозирования технического состояния линейной части магистральных газопроводов (АЭС МГ) как составная часть региональной и глобальной систем экологического мониторинга / [В. Е. Костюков, А. П. Кудяев, И. А. Павликов и др.] // Междунар. специализ. выставка-конф. военных и двойных технологий «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления», Нижний Новгород, 3–5 апреля 2002 г. – Тр. конф. «Информационные технологии и автоматизированные системы управления». – Т. 1. – Секц. 1. – М. : ЦНИИ «Электроника». – 2002. – С. 22–25.
12. Лебедев А. А. Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов / А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 2. – С. 3–8.
13. Лебедев А. А. Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов. – К. : ИПП НАН Украины, 1998. – 43 с. – (Препринт / НАН Украины, Ин-т проблем прочности).
14. Махненко В. И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации / В. И. Махненко // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10 / 11. – С. 112–121.
15. Недосека А. Я. О квантовании процесса возникновения и развития трещин / А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1989. – № 1. – С. 11–15.
16. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека ; под ред. Б. Е. Патона. – [4-е изд., перераб. и доп.] – К. : Индпром, 2008. – 814 с.
17. Недосека А. Я. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техническая

- диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 2. – С. 7–17; 12-я Междунар. деловая встреча «Диагностика–2002» (Белек, 23–26 апреля 2002 г.) – Т. 2. Диагностика электромеханического оборудования, надежности КС и экологического мониторинга. – Ч. 2. – М.: ИРЦ Газпром, 2002. – 142 с.
18. Недосека А. Я. Некоторые особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 2. – С. 3–11.
 19. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии / С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
 20. Недосека С. А. Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) / С. А. Недосека, А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 3. – С. 20–26.
 21. Об управлении безопасностью эксплуатации оборудования, несущего рабочую нагрузку. Непрерывный акустико-эмиссионный мониторинг / [А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др.] // Хімічна промисловість України. – 2014. – № 1. – С. 10–21.
 22. Оптимизация размещения датчиков и повышение точности локации источников акустической эмиссии / С. А. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – № 3. – С. 18–25.
 23. О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре / [Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 7–14.
 24. Панасюк В. В. Основы механики разрушения материалов : справ. пособ. в 4 т. / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон ; под общ. ред. акад. НАН Украины В. В. Панасюка. – К. : Наукова думка, 1988. – Т. 1. – 487 с.
 25. Пат. 2226272 Российской Федерация, МПК7G 01 N. Способ акустико-эмиссионного контроля и диагностирования резервуаров для хранения сжиженных газов / Тарасенко В. И., Ким Б. Г., Румянцев В. Н., Гришин А. В. ; опубл. 27.03.2004.
 26. Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10/11. – С. 7–13.
 27. О некоторых путях построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций / Б. Е. Патон, И. В. Кудрявцев, А. Я. Недосека, А. Е. Коротынский // Автоматическая сварка. – 1974. – № 9. – С. 1–5.
 28. Патон Б. Е. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 4. – С. 6–10.
 29. Патон Б. Е. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций / [Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др.] – К. : Индпром, 2012. – 312 с.
 30. Патон Б. Е. О состоянии работ в Украине по технической диагностике промышленного оборудования, конструкций и сооружений / Б. Е. Патон, А. Я. Недосека // Автоматическая сварка. – 1998. – № 11. – С. 3–9.
 31. Петерсен Т. Б. Разработка и использование автоматической системы классификации для идентификации сигналов акустической эмиссии / Т. Б. Петерсен // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1993. – № 3. – С. 3–9.
 32. Пустовой В. Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин (Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса) / В. Н. Пустовой. – М. : Транспорт, 1992. – 256 с.
 33. Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА–3.9 / [А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 3. – С. 16–22.
 34. Скальський В. Р. Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії / В. Р. Скальський // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 4. – С. 29–36.
 35. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес – М. : Мир, 1978. – 411 с.
 36. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения : в 2 т. / В. Феллер. – М. : Мир, 1984. – Т. 1. – 528 с.; Т. 2. – 738 с.
 37. Фролов К. В. Определение прочности, ресурса и живучести конструкций / К. В. Фролов, Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Автоматическая сварка. – 2003. – № 9/10. – С. 89–96.
 38. Использование метода акустической эмиссии для экспресс-контроля разрушения бетонов с добавками пластификаторов / [Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. – № 3. – С. 12–16.
 39. Черепанов Г. П. Квантовая механика разрушения / Г. П. Черепанов // Проблемы прочности. – 1990. – № 2. – С. 3–9.
 40. Obodovsky B. Application of a Permanent Acoustic Emission Monitoring System on Four Ammonia Storage Tanks / B. Obodovsky, A. Fedchun, A. Nedoseka // Ammonia Plant Safety. – AIChE Technical Manual. – 2006. – Vol. 39. – P. 24–34.
 41. Balderston H. L. The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena / H. L. Balderston // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 297–317.
 42. Chausov N. G. Accelerated strength check by the acoustic emission method for concrete with additives / N. G. Chausov, S. A. Nedoseka, N. D. Gakh // International Conference «Acoustic Emission 99». – Brno, 15–17 June 1999. – P. 51–56.
 43. Stone D. E. Acoustic Emission parameters and their interpretation / D. E. Stone, P. F. Dingwall // NDT international. – 1977. – 10. – P. 51–56.
 44. Forli O. NDT offshore : a review of current practice / O. Forli, G. A. Raine // INSIGHT. – June 1996. – Vol. 38. – № 6.
 45. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emission / P. P. Gillis // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 20–29.
 46. Tsuda H. Development of Fiber Bragg Grating Sensors for Structural Health Monitoring / H. Tsuda // JSNDI. – 54–2 (2005). – P. 71–75 (in Japanese).
 47. Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking / C. E. Hartbower, W. G. Reuter, C. F. Morais, P. P. Crimmins // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour. – 7–8 December. – 1971. – P. 187–221.
 48. Nakamura Yosio. Amplitude distribution of acoustic emission signals / Yosio Nakamura, C. L. Veach, B. O. McCauley // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 164–186.
 49. Paton B. E. Diagnostic of designs and safety of an environment / B. E. Paton, A. J. Nedoseka // the Report on international conference «The Human factor and environment». – International Institute of Welding. – July 19–20 1999. – Lisbon, Portugal.
 50. About experience of Ukraine in the solution of problems of safety control exploitation of welded structures and preservation of an environment / B. E. Paton, A. J. Nedoseka, L. M. Lobanov, S. A. Nedoseka // the Report № IIW DOC XI –735 – 00 on commission XI «International Institute of Welding». – July 9–14 2000. – Florence, Italy.
 51. Nishinoiri S. Evaluation of Microfracture Mode in Ceramic Coating during Thermal Cycle Test using Laser AE Technique / S. Nishinoiri, M. Enoki, K. Tomita // Materials Transactions. – 45–1 (2002). – P. 92–101.

52. Reid Stanley. Experience of Using a Non-Intrusive Approach to the Inspection of a 23 Year Ammonia Storage Tank / Stan-ley Reid // 49th AIChE Safety in Ammonia Plants and Related Facilities Symposium. Denver, Colorado. – Ammonia technical manual. – 2004. – P. 219–230.
53. Kishi T. Acoustic Emission – Beyond the Millennium / T. Kishi, M. Jhtsu, S. Yuyama. – Elsevier Science Ltd. – 2000. – 239 p.
54. Sogabe T. Monitoring and Source Location of Acoustic Emissions from Atmospheric Corrosion of Water-Stage Cylindrical Tank Bottom Plate Exposed to Outdoor Weathering / T. Sogabe, K. Matsuuri, M. Takemoto // JSNDI. – 53–1 (2004). – P. 35–39 (in Japanese).
55. Tetelman A. S. Acoustic emission testing and micro cracking processes / A. S. Tetelman, R. Chow // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 30–40.
56. Investigation on AE Signal/Noise Processing in Corrosion Camage Evaluation of Tank Bottom, in Progress in Acoustic Emission / Z. Li, S. Yuyama, M. Yamada et al. // J. of Acoustic Emission. – 2005. – Vol. 23. – P. 171–178.

Practice of operating machinery, structures and constructions is increasingly demanding development of methods and means which would enable determination, proceeding from available data, of their functional capabilities at any moment of time, both in the past and in the present, as well as predicting their state and future behaviour on the base of these data. Usually, it is difficult to determine by calculation in what manner and at what parameters values, characterizing structure serviceability, its fracture will start. The current scope of knowledge on the dependence of assumed fracture criteria on numerous parameters is most often insufficient. Considering the possibility of existence of such operating parameters, influencing the exhaustion of material load-carrying properties, about which simply nothing is known, it is difficult to assess the design accuracy; and in some cases the error can turn out to be inadmissibly high. Monitoring technology based on acoustic emission (AE) provides a higher accuracy of assessment of the structure sate, determined just by the accuracy of instruments and their application procedures in each specific case. Its application allows transition from monitoring the state of structures to controlling their safe operation. 56 References, 15 Figures.

Поступила в редакцию
10.02.2016

ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Одесса, отель «Курортный» (www.inkurort.com)
19 – 23 сентября 2016 г.



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

Тематика конференции

Математическое моделирование:

- ♦ физических явлений, определяющих эффективность и распределение тепловложений при сварочном нагреве;
- ♦ процесса переноса металла при сварке;
- ♦ образования и гидродинамики сварочной ванны при сварке плавлением сплошных и пористых материалов;
- ♦ кристаллизации сварочной ванны, химического состава зоны проплавления и образования химической неоднородности;
- ♦ кинетики микроструктурных изменений при одно- и многопроходной сварке;
- ♦ зависимости химический состав — микроструктура — механические свойства;

- ♦ транспорта водорода в сварных соединениях;
- ♦ оценки риска образования холодных (водородных) трещин;
- ♦ остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке с учетом изменений микроструктуры металла;
- ♦ деградации свойств материала сварных соединений под воздействием высоких температур, химически агрессивных сред и ядерного облучения;
- ♦ процесса идентификации дефектов в сварных соединениях при неразрушающих методах испытаний
- ♦ кинетики деформационных процессов в температурных интервалах образования горячих трещин.

Информационные технологии в сварке, наплавке и нанесении покрытий.

Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский. Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и направить ее в Оргкомитет до 21 июня 2016 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов. Требования к оформлению тезисов. Текст следует набирать на одном из рабочих языков в редакторе WORD (кегель 12, через 1,5 интервала). Объем тезисов — 1 страница.

Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 21.06.2016 г. Рассылка второго информационного сообщения до 01.07.2016 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 15.07.2016 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua, romanova@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2016> | www.patonpublishinghouse.com

ДИАГНОСТИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Л. М. ЛОБАНОВ², В. А. ЗНОВА¹, В. А. ПИВТОРАК², И. В. КИЯНЕЦ²

¹ГП «АНТОНОВ». 03062, г. Киев, ул. Академика Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

²ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработана технология неразрушающего контроля качества композиционных элементов авиационных конструкций, позволяющая эффективно выявлять внутренние дефекты (расслоения, утонения, разрушение волокон композита и др.), которые могут вызвать под действием внешней нагрузки концентрацию напряжений. Метод может использоваться как в процессе производства и эксплуатации конструкций, так и при техническом обслуживании и ремонте. Библиогр. 7, рис. 11.

Ключевые слова: неразрушающий контроль качества, диагностика авиационных конструкций, композиты, широгрaфия

Развитие ведущих отраслей авиационной промышленности, применение новых металлических и композиционных материалов тесно связаны с решением проблем повышения надежности и долговечности авиационных конструкций, которые работают в условиях сложного механического воздействия и температурных градиентов. Концентрация напряжений, возникающая в зоне дефектов, в ряде случаев вызывает разрушение таких конструкций. В настоящее время для выявления дефектов в материалах и конструкциях разработана группа таких неразрушающих методов, как рентгеновский, радиографический, ультразвуковой, люминесцентный, вихревых токов и др. [1–3]. Каждый из этих методов имеет свои недостатки и преимущества, однако ни один из них не является универсальным и не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к средствам и методам неразрушающего контроля.

Между тем инженерная практика ставит все новые задачи перед неразрушающими методами, для решения которых необходимы новые методы испытаний, позволяющие получать более полную информацию об объекте контроля. К таким методам относится метод электронной широгрaфии, который не является альтернативой другим экспериментальным методам механики твердого деформируемого тела, а дополняет их [4–6].

Метод электронной широгрaфии позволяет получать по всей поверхности контролируемого участка объекта картину распределения деформаций, возникающих в результате приложения к объекту определенной нагрузки. Даже без дальнейшего углубленного анализа эта картина дает возможность получать полезную для задач кон-

троля информацию, позволяя обнаруживать различные дефекты.

Возможность использования электронной широгрaфии в области дефектоскопии объясняется следующим. Любые неоднородности структуры материала (трещины, отслоения и т.д.) можно рассматривать как включение элементов с разной степенью жесткости, приводящих к дискретности физико-механических характеристик материала. Это является причиной формирования локальных возмущений силового поля и концентрации напряжений и деформаций в околodefектной области объекта, подвергаемого внешним нагрузкам. Поэтому, если величина аномальной деформации поверхности объекта при его нагружении, обусловленная наличием дефекта, превышает нижний предел чувствительности используемого широгрaфического интерферометра, такой дефект проявляется локальным изменением интерференционной картины полос. Непосредственное влияние дефекта на вид интерференционной картины позволяет осуществлять контроль на основе анализа интерферограммы не прибегая в большинстве случаев к ее количественной обработке, что снижает время контроля и дает возможность использовать метод в условиях производства.

Надежность выявления дефектов на основе анализа интерферограмм определяется, в первую очередь, правильным учетом следующих двух факторов. Во-первых, выбором оптимального вида нагружения объекта, т. е. создание такого напряженного состояния, которое приводит к наибольшим различиям в распределении деформаций на поверхности объекта в дефектных и бездефектных участках. Во-вторых, использованием при

проведении исследований широкографического интерферометра, имеющего наибольшую чувствительность производной от одной из компонент вектора перемещений (u , v и w), на распределение которой при данном типе нагружения в наибольшей степени влияет наличие дефекта.

Чувствительность широкографического интерферометра на основе интерферометра Майкельсона к производной $\partial w/\partial x$ или $\partial w/\partial y$ (из плоскости объекта) значительно выше, чем к производным $\partial u/\partial x$, $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$ или $\partial v/\partial y$ (перемещения u , v в плоскости объекта). Поэтому при проведении неразрушающего контроля качества различных объектов, направления освещения и наблюдения выбирают по возможности ближе к нормали к поверхности объекта. В этом случае для темных и светлых интерференционных полос на широкограмме получают следующие зависимости [5, 7]:

для темных интерференционных полос:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta y} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta y}, \quad (2)$$

для светлых интерференционных полос:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta x} = \frac{N\lambda}{2\delta x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\delta y} = \frac{N\lambda}{2\delta y}, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi$ – относительная разность фаз; λ – длина волны лазерного излучения; δx и δy – величины широдвига в выбранных направлениях OX и OY ; N – порядок полосы.

Равенства (1)–(4) позволяют выполнять прямую оценку деформаций из плоскости объекта ($\frac{\partial w}{\partial x}$, $\frac{\partial w}{\partial y}$) после определения порядка полосы.

Разработанную технологию широкографического НК качества использовали для диагностики тестовых образцов, изготовленных на ГП «АНТОНОВ» из композиционных углеродистых материалов трех типов: однонаправленный композит, мультинанправленный композит и композит, имеющий с двух сторон лакокрасочное покрытие (ЛКП). Тестовые образцы выполняли в виде пластинок размерами 150×100 мм и толщинами 2 и 3 мм (рис. 1) из углеродистых препрегов фирмы «Hexcel» – это материалы, аналогичные используемым для производства тонкостенных панелей оперения транспортного самолета, который изготавливается на предприятии.

После изготовления часть образцов подвергалась удару падающим грузом, который имитирует разрушение согласно регламенту ASTM D7136/D7136M-07. В дальнейшем тестовые образцы испытывались на сжатие (согласно ASTM D7137/

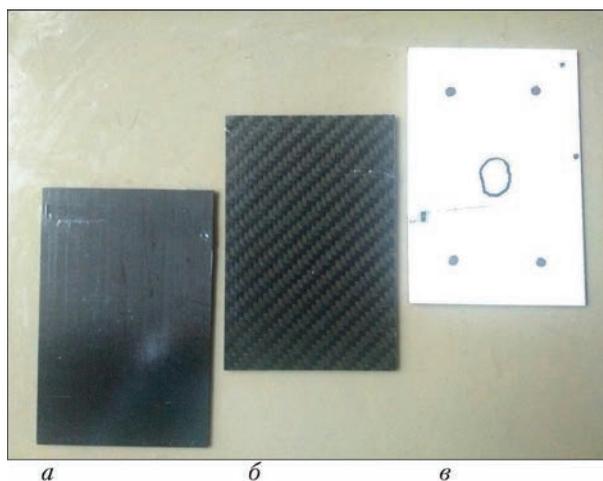


Рис. 1. Общий вид тестовых образцов, изготовленных из композиционных материалов трех типов: однонаправленный (а) и мультинанправленный (б) углеродистые композиты, а также углеродистый композит, покрытый с двух сторон краской (в)

D7137M-07) на базе ГП «АНТОНОВ» с использованием универсальной серво-гидравлической машины УИМ-25, цифрового контроллера MTS FlexGT и специального приспособления, которое обеспечивает условия опирания торцевых и боковых поверхностей образца во время его нагружения со скоростью 1,25 мм/с.

При проведении экспериментов исследуемые образцы размещались вертикально и фиксировались на монтажном столе с помощью механического приспособления. Ширографический интерферометр располагался на расстоянии около 400 мм напротив исследуемого образца, для нагружения которого использовали термический способ в виде обдува лицевой поверхности нагретым воздухом с расстояния около 150 мм.

Контроль тестового композиционного образца выполнялся в следующей последовательности: исследуемый образец освещался лазерным светом, с использованием оптического световода, затем отраженную от контролируемого участка поверхности световую волну, которая характеризует его начальное состояние, записывали с помощью ССD-камеры в память компьютера. После этого поверхность образца, с целью ее деформирования, обдували горячим воздухом (примерно 100 °С) в течение 3...5 с и записывали в память компьютера отраженную световую волну, которая характеризует нагруженное состояние исследуемого образца. С помощью компьютерной программы записанную оптическую информацию обрабатывали для получения широкограммы, картины деформирования контролируемой поверхности образца и кривой распределения производной $\partial w/\partial x$ или $\partial w/\partial y$ вдоль выбранного сечения (на представленных рисунках кривая А–А соответствует сечению в зоне с дефектом, а кривая Б–Б – сечению в бездефектной зоне). Резкое локаль-

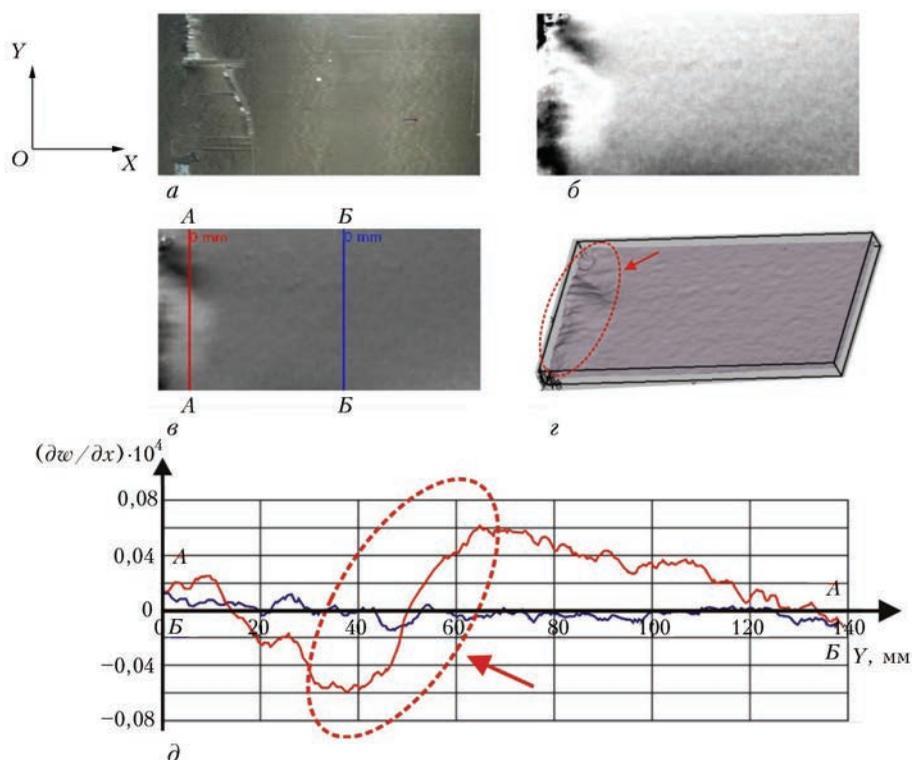


Рис. 2. Результаты широкографического контроля тестовой однонаправленной композитной пластинки толщиной 3 мм после испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом: *a* – общий вид исследуемой пластинки; *б* – интерференционная картина контролируемого участка; *в* – фазовая картина контролируемого участка с нанесенными сечениями; *г* – трехмерная картина поверхности деформирования контролируемого участка; *д* – кривая распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль выбранных сечений (зона дефекта выделена и указана стрелками)

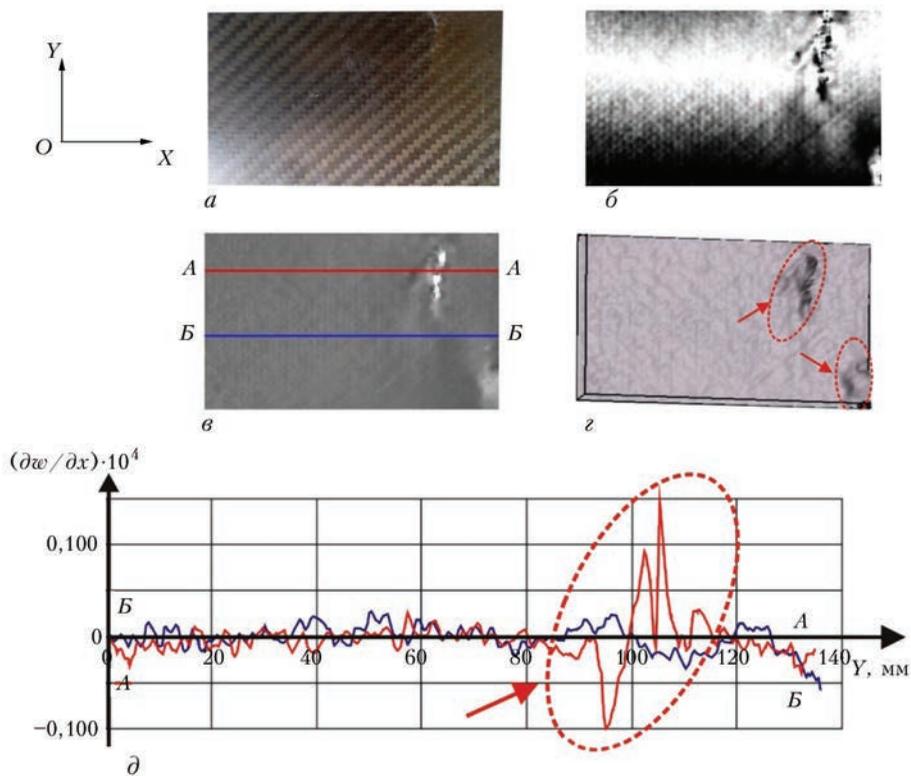


Рис. 3. Результаты широкографического контроля тестовой мультинаправленной композитной пластинки толщиной 2 мм после испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание *a*–*д* такие же, как на рис. 2)

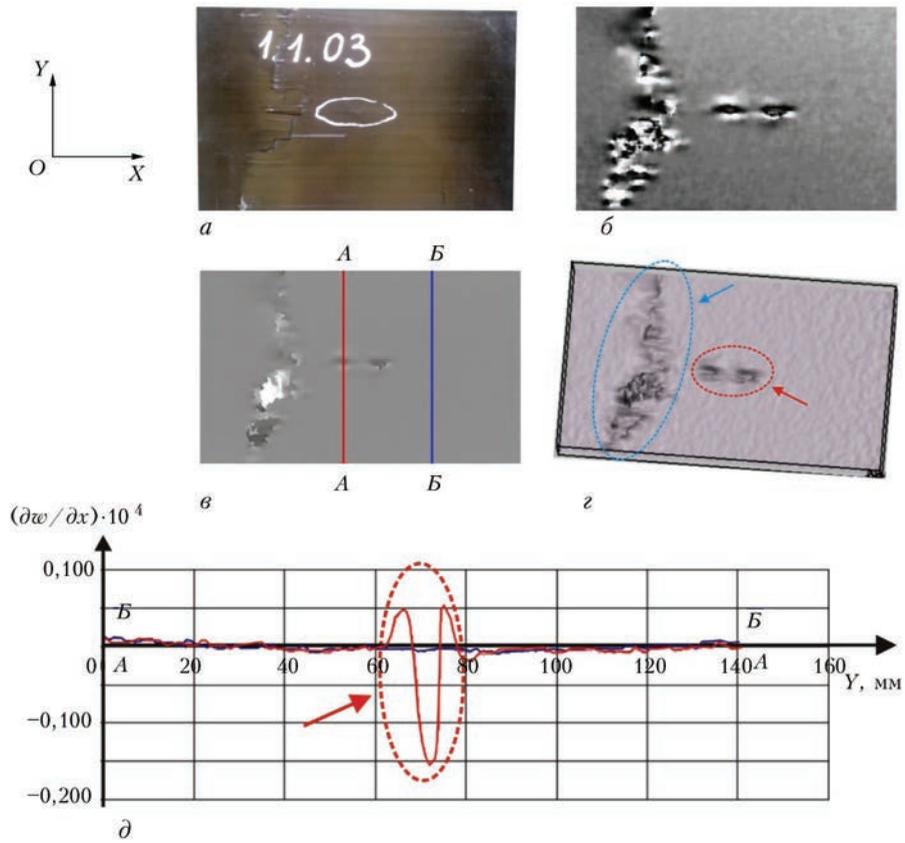


Рис. 4. Результаты широкографического контроля тестовой однонаправленной композитной пластинки толщиной 2 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 2)

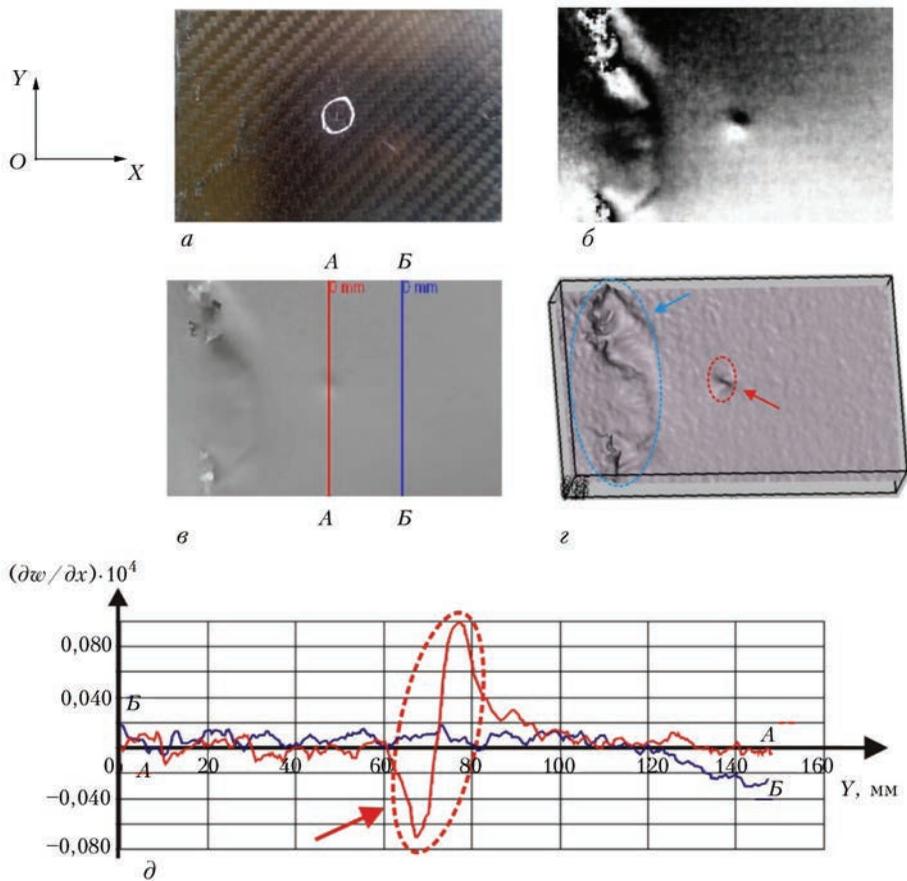


Рис. 5. Результаты широкографического контроля тестовой мультинаправленной композитной пластинки толщиной 3 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 2)

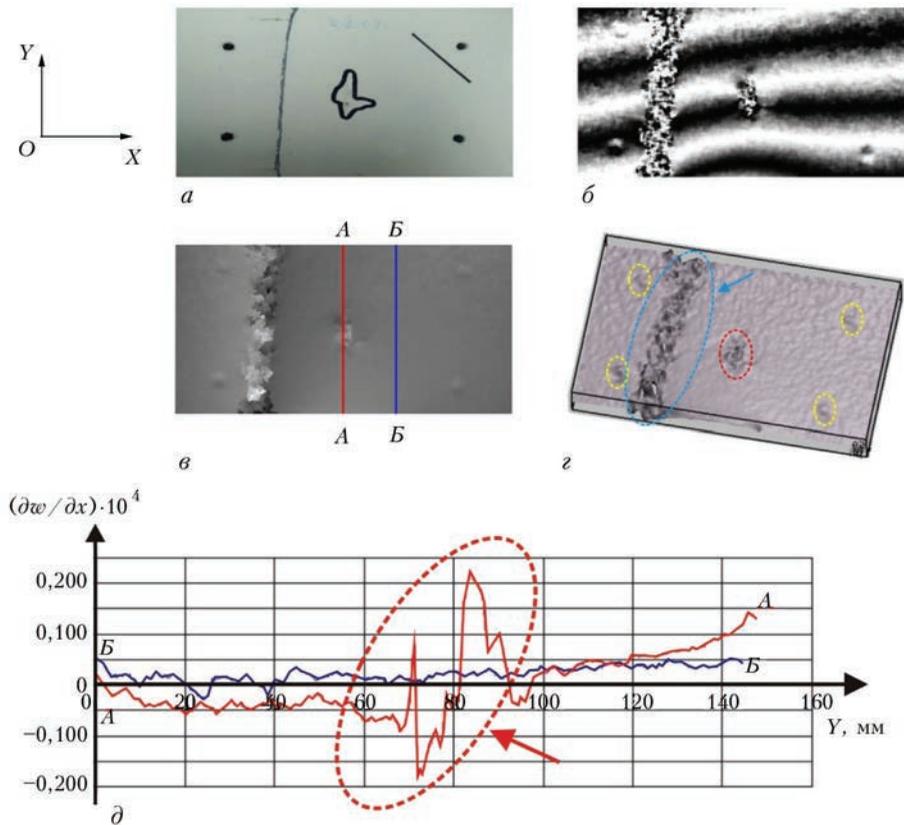


Рис. 6. Результаты широкографического контроля тестовой углеродистой покрытой краской с двух сторон композитной пластинки толщиной 3 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание *a–d* такие же, как на рис. 2)

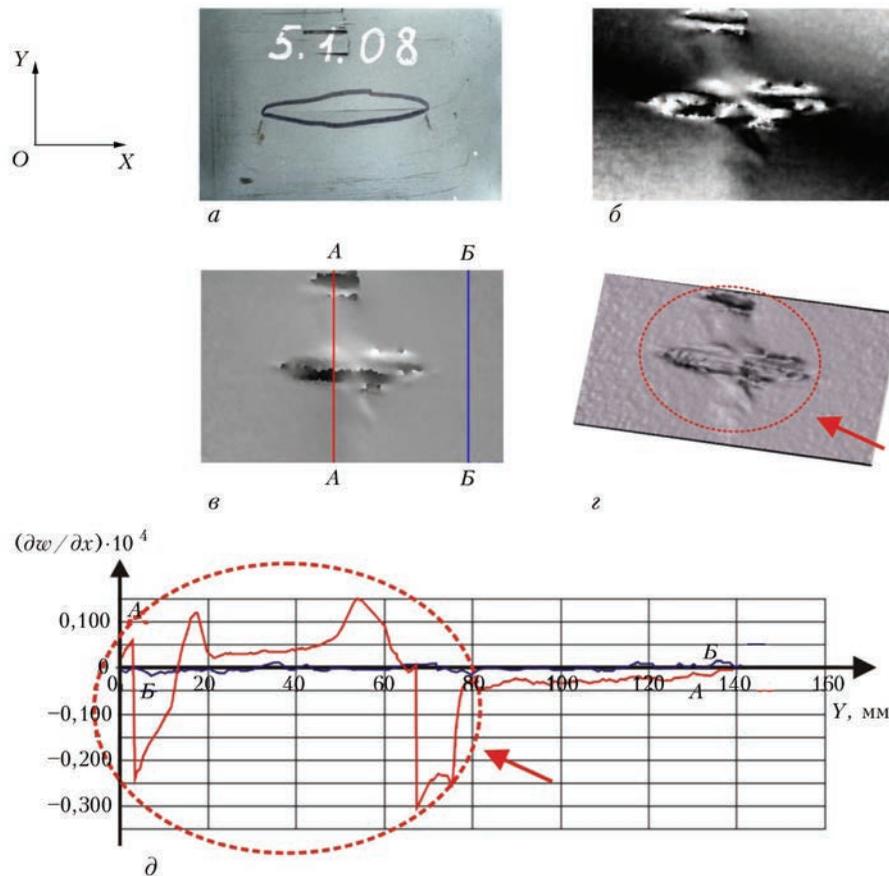


Рис. 7. Результаты широкографического контроля тестовой углеродистой покрытой краской с двух сторон композитной пластинки толщиной 2 мм после удара и испытания на сжатие при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание *a–d* такие же, как на рис. 2)

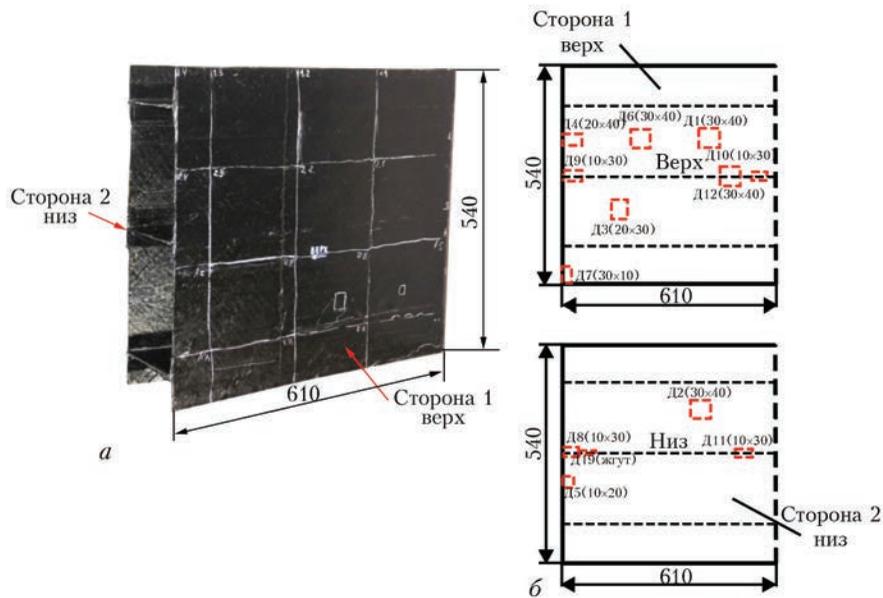


Рис. 8. Общий вид композиционного элемента рулевого отсека (а) и схема расположения внутренних дефектных зон (б)

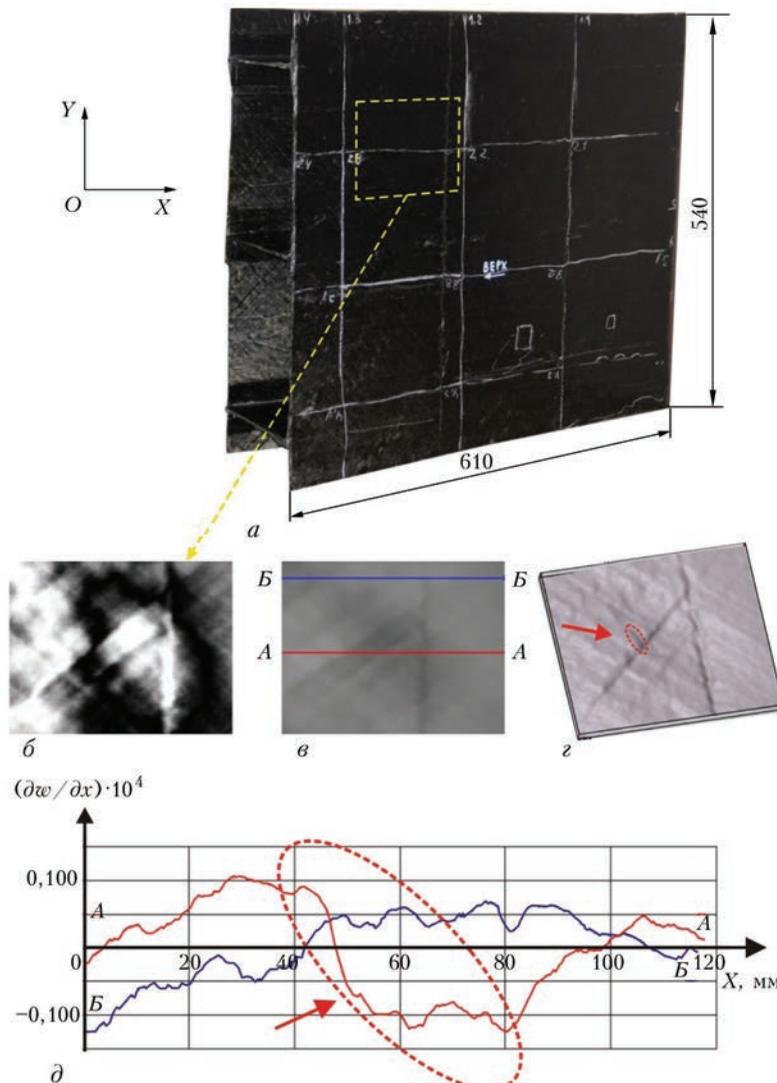


Рис. 9. Результаты широкографического контроля стороны 1 (основной лист) натурального композиционного элемента рулевого отсека при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом: а – общий вид исследуемого элемента с очерченным участком контроля; б – интерференционная картина контролируемого участка; в – фазовая картина деформирования контролируемого участка с нанесенными сечениями; г – трехмерная картина поверхности деформирования контролируемого участка; д – кривая распределения производной $\partial w / \partial x$ вдоль выбранных сечений (дефектная зона выделена и указана стрелками)

ное изменение величины и знака производной на фоне общего незначительного деформирования исследуемой поверхности характеризует наличие дефектной зоны (на рисунках очерчена и отмечена стрелкой).

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что испытание сжатием приводит к появлению зоны расслоения материала (рис. 2, 3), а испытание ударом на участке его приложения, приводит к разрушению волокон (рис. 4–7). На рис. 6 показаны зоны повреждения лакокрасочного покрытия при опирании боковой поверхности образцов во время испытания сжатием.

С использованием созданной технологии выполнялись экспериментальные исследования по контролю качества натурального элемента рулевого отсека, изготовленного из композиционного материала, с известными дефектными зонами. Элемент представлял собой клеенный углепластиковый лист размерами 1220×540×1 мм, согнутый посередине как клин с углом при вершине 20°. В

промежутке между согнутым листом располагались три ребра жесткости в виде клина, которые приклеивались к верхнему и нижнему углепластиковому листу. На рис. 8 показаны общий вид контролируемого элемента и схема расположения внутренних дефектных участков.

Учитывая сложность конструкции элемента рулевого отсека, а также то, что главными дефектами такой конструкции являются расслоения и отсутствие клееного соединения ребер жесткости и обшивки, при проведении ширографического неразрушающего контроля, оптимальным является применение теплового нагружения в виде обдува нагретым воздухом с помощью промышленного фена.

При проведении экспериментов исследуемый участок рулевого отсека подвергался обдуву в течение около 3 с теплым воздухом, нагретым до температуры примерно 120° с расстояния 100 мм от контролируемой поверхности. Затем в память компьютера записывалась световая волна, которая характеризует начальное состояние исследуемого участка.

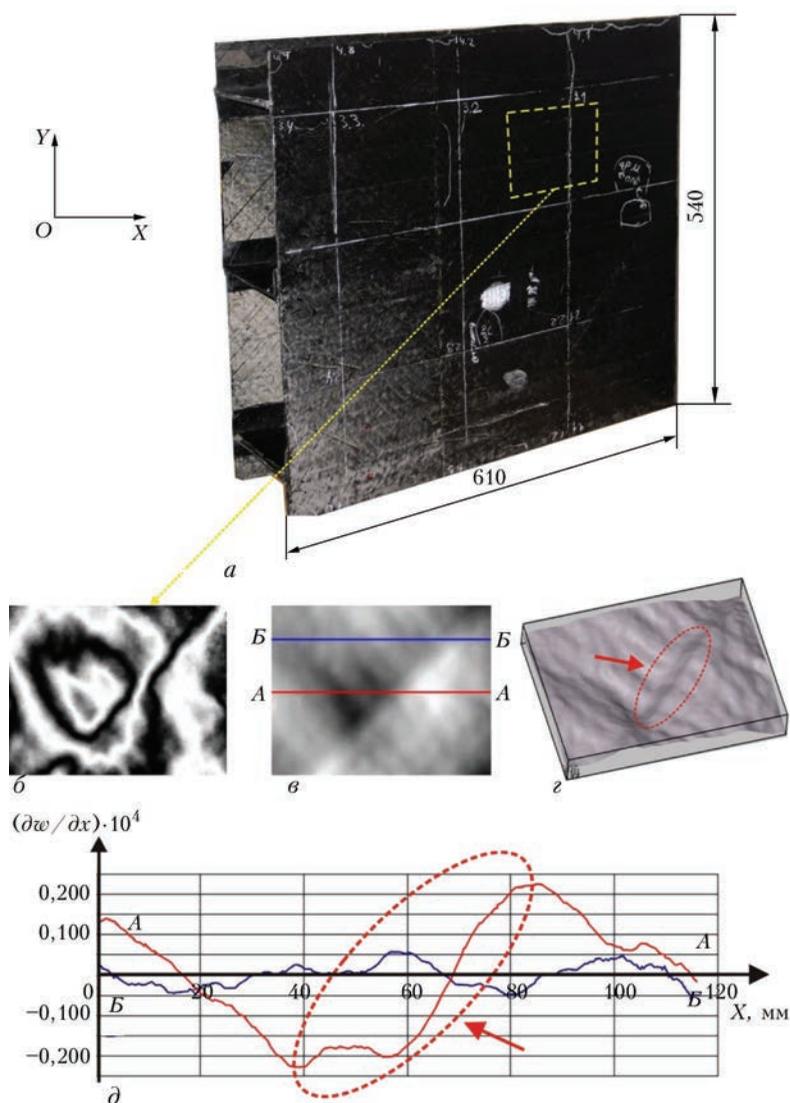


Рис. 10. Результаты ширографического контроля стороны 2 (основной лист) натурального композиционного элемента рулевого отсека при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание а–д такие же, как на рис. 9)

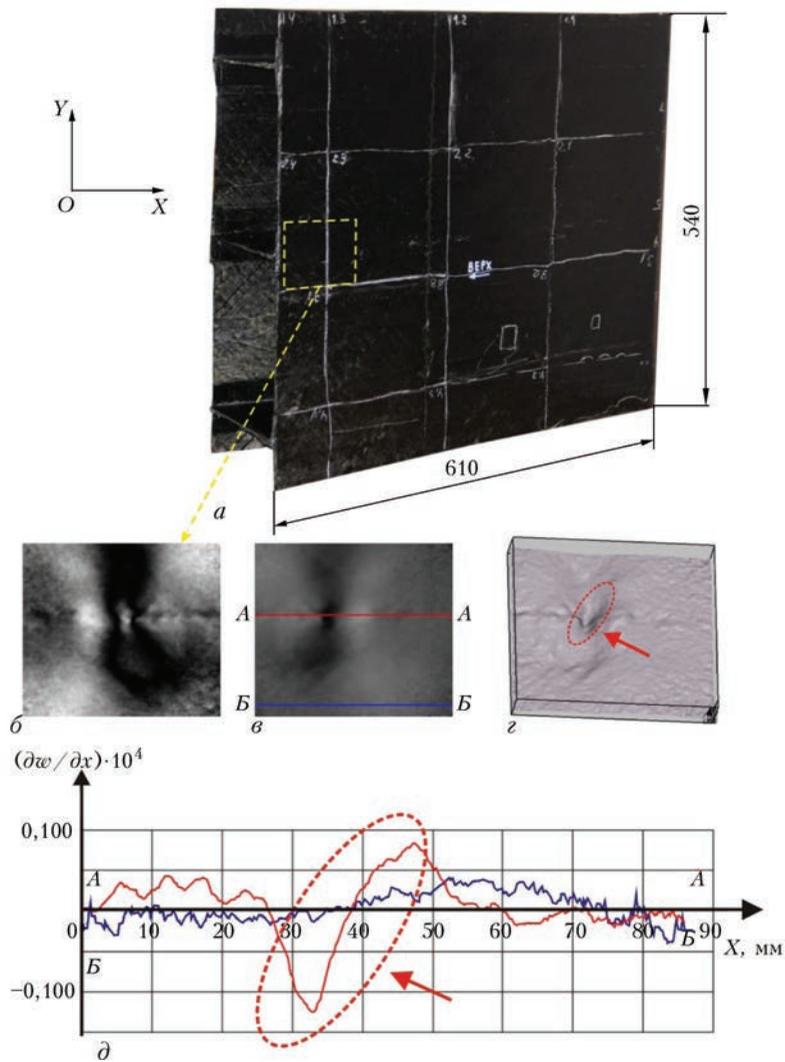


Рис. 11. Результаты широкографического контроля стороны 1 (место соединения ребра жесткости с обшивкой) натурального композиционного элемента рулевого отсека при использовании в качестве нагружения обдува горячим воздухом (описание *a–d* такие же, как на рис. 9)

дуемого участка. На стадии остывания в память компьютера записывалась вторая световая волна, которая характеризует деформированное, вследствие температурного нагружения, состояние исследуемого участка.

На рис. 9 и 10 приведены результаты широкографического контроля элемента рулевого отсека, которые свидетельствуют о наличии дефектов в основном листе. На рис. 11 показаны результаты выявления дефектных участков клееного соединения ребра жесткости с обшивкой.

Анализ приведенных результатов контроля качества показал, что метод электронной широкографии в сочетании с термическим нагружением является эффективным при выявлении внутренних дефектов как в основном листе контролируемого элемента, так и в участках соединения ребер жесткости с обшивкой.

Выводы

Разработана технология диагностики элементов авиационных конструкций, изготовленных из

композиционных материалов с применением метода электронной широкографии.

Установлено, что для НК качества элементов авиационных конструкций целесообразно использовать оптическую схему для регистрации производных от перемещений w (внеплоскостные перемещения по нормали к контролируемой поверхности объекта). При этом величина широдвига выбирается в диапазоне от 1 до 10 мм.

Разработанная технология НК качества композиционных элементов авиационных конструкций позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты (расслоения, утонения, разрушение волокон композита и др.), которые могут вызвать под действием внешней нагрузки концентрацию напряжений.

Эффективность применения созданной технологии для диагностики композиционных элементов авиационных конструкций подтверждена при проведении экспериментов на тестовых образцах и натурном элементе рулевого отсека самолета. При этом метод электронной широкографии может

использоваться на всех стадиях контроля: от процесса производства конструкций до их эксплуатации, как при техническом обслуживании, так и при их ремонте.

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів ; в 8 т. – Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика. – Львів, Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека; под ред. Б. Е. Патона. – К. : Индпром, 2001. – 840 с.
3. Rastorgy P. K. Trends in nondestructive and inspection / P. K. Rastorgy. – Amsterdam-Lausanne: Elsevier, 2000. – 633 p.
4. Діагностика елементів і вузлів конструкцій з використанням метода електронної широкоточкової діагностики / Л. М. Лобанов,

The technology was developed for non-destructive testing of composite elements of aircraft structures allowing effective detection of internal defects (lamination, thinning, fracture of composite material fiber) which can promote stress concentration under external loading effect. The method can be used during production and structure operation as well as maintenance servicing and repair. Ref. 7, Figures 11.

Key words : non-destructive testing, diagnostic of aircraft structures, composite materials, shearography.

- В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 7–13.
5. Hung Y. Y. Shearography: An optical measurement technique and applications / Y. Y. Hung, H. P. Ho // Materials Science and Engineering. – 2005. – R49. – P. 61–87.
6. Технология неразрушающего контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций методом электронной широкоточкової діагностики / Л. М. Лобанов, В. Я. Знова, В. А. Пивторак [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 15–18.
7. Технологія неруйнівного контролю матеріалів і елементів конструкцій з використанням електронної широкоточкової діагностики / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, О. М. Олійник [та ін.] // Методи та прилади контролю якості. – 2003. – № 11. – С. 9–14.

Поступила в редакцию
07.04.2016



ВСЕУКРАЇНСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ. УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ КАДРІВ»

7–9 вересня 2016 р.
м. Маріуполь

- Підвищення якості і ефективності процесів зварювання та інших споріднених технологій
- Проблеми проектування, виготовлення і експлуатації зварних конструкцій
- Система сертифікації продукції зварювального виробництва
- Фізико-хімічні процеси при зварюванні та споріднених процесах
- Контроль якості та надійність зварних конструкцій
- Енерго- та ресурсозбереження у зварюванні
- Удосконалення підготовки кадрів в умовах багаторівневої системи вищої освіти
- Математичне, фізичне, імітаційне моделювання, комп'ютерні та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах
- Механізація та автоматизація у зварюванні та споріднених процесах
- Матеріалознавство у зварюванні та споріднених процесах

РОБОЧІ МОВИ КОНФЕРЕНЦІЇ
українська, російська, англійська.

До початку роботи конференції будуть видані тези доповідей. Найкращі доповіді будуть рекомендовані для видання в журналі «Вісник ДВНЗ «ПДТУ»».

АДРЕСА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет (ПДТУ), вул. Університетська 7,
87500, м. Маріуполь, Донецька обл., Україна
Тел. кафедри: (380) 629 44 65 91, (380) 629 44 62 16
E-mail кафедри: pstu.edu.oitzv@gmail.com

ОЦЕНКА РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ В ВИДЕ ОТВЕРСТИЙ*

В. С. ГУДРАМОВИЧ, А. В. РЕПРИНЦЕВ, С. А. РЯБОКОНЬ, Е. В. САМАРСКАЯ

Ин-т технической механики НАНУ и Гос. космического агентства Украины. 49005, г. Днепрпетровск-5,
ул. Лешко-Попеля, 15. E-mail: office.itm@nas.gov.ua

Исследованы оболочечные конструкции ракетно-космической техники с отверстиями, которые являются основным видом концентраторов напряжений при пластическом деформировании материала. При исследовании напряженно-деформированного состояния применены разработанные проекционно-итерационные схемы реализации вариационно-сечного метода конечных элементов, существенно уменьшающие машинное время расчета по сравнению с традиционным методом конечных элементов (на одной мелкой сетке). На основе разработанного программного обеспечения исследованы задачи напряженно-деформированного состояния при осевом нагружении оболочечно-пластинчатых элементов конструкций с отверстиями с учетом их взаимного влияния при пластических деформациях. Соответствующий анализ дает возможность выбора геометрических параметров элементов конструкций, отверстий, их формы и расстояний между ними, стратегии нагружения, влияющих на несущую способность. Проведен численный анализ влияния подкреплений отверстий. Предложена схема прогнозирования несущей способности отсеков с учетом трансформации зон пластических деформаций при нагружении. Проведено внедрение результатов при расчетах конкретных ракет-носителей. Библиогр. 12, рис.13.

Ключевые слова: оболочечные конструкции ракетно-космической техники, пластическое деформирование, методология оценки ресурса, несущая способность

Одним из приоритетных направлений научно-технических разработок в Украине является ракетно-космическая техника (РКТ). Конструкции РКТ находятся под действием интенсивных нагрузок разного вида (осевая сила – действие двигателей; давление (внутреннее – наддув в топливных баках, внешнее – поверхностное давление); поперечные нагрузки – маневры на активном участке полета, транспортировка, хранение; импульсное нагружение – старт, включение и выключение двигателей, аварийное прекращение пуска и др.). Основную опасность для прочности представляет концентрация напряжений, возникающая вследствие наличия отверстий-люков или других концентраторов напряжений (КН) (подкреплений, накладок, структурных дефектов и повреждений). Люки предназначены для проведения технологических операций в элементах внутренней структуры ракет-носителей (РН). Концентрация напряжений является опасной при эксплуатации объектов РКТ. Она может вызвать преждевременное разрушение или появление недопустимых деформаций.

Конструкции РКТ эксплуатируются при высоком уровне нагрузок. Определение параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и несущей способности (НС), необходимых для оценки и продления ресурса элементов конструк-

ций РКТ, должно осуществляться с учетом пластического деформирования материала (ПД).

Разработана методология численных исследований НДС и оценки ресурса неоднородных конструктивных элементов объектов РКТ в зонах расположения КН.

Исследования проводились по таким направлениям:

- анализ конструктивного оформления современных РН с концентраторами напряжений. Постановка задач оценки прочности, НС и ресурса;

- разработка общих численных методов расчета прочности пластинчато-оболочечных конструкций РН на основе новых проекционно-итерационных (ПИ) схем метода конечных элементов (МКЭ) с учетом ПД для оценки ресурса конструкций РКТ;

- разработка численных методов решения задач оценки прочности и ресурса конструкций РН при учете взаимного влияния КН в виде отверстий;

- численный анализ НДС отсеков РН с одним прямоугольным отверстием при ПД;

- численный анализ НДС отсеков РН с несколькими (одинаковыми и различными) прямоугольными отверстиями с учетом их взаимовлияния при ПД;

* По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2013–2015 гг.)

– численный анализ (ЧА) НДС отсеков РН при наличии подкреплений (прямоугольных и треугольных) в углах отверстий и влияние на НДС изменения ориентаций отверстий;

– анализ влияния появления и трансформации зон ПД на несущую способность.

Конструктивное оформление современных РН с концентраторами напряжений. Задачи оценки прочности, несущей способности и ресурса. Для космической техники характерны экстремальные условия эксплуатации; для обеспечения безотказной работы ее конструкций необходим поиск новых решений задачи прочности и динамики конструкций РКТ. Для оптимального сочетания необходимых параметров прочности и жесткости с минимальной массой используются пластинчато-оболочечные конструкции. Такие конструкции в РКТ имеют неоднородную структуру, связанную в большинстве случаев с наличием отверстий-люков разной формы. Наиболее распространенной является прямоугольная форма отверстий. Осевая сжимающая сила является основной для отсеков РН (полет на активном участке траектории, стоянка на стартовой установке). Наличие вырезов приводит к концентрации НДС [1–3]. При этом усложняется характер взаимодействия элементов конструкции и нагрузки при последующем нагружении. Так, в известных испытаниях баков при внутреннем давлении вначале давление может вызывать появление несовершенств формы возле люков днища, уменьшающих давление разрушения.

На рис. 1 показано разрушение днища бака горючего первой ступени РН «Циклон-3» при испытаниях на действие внутреннего давления (контрольно-выборочные испытания). На рис. 2 приведены модели сферических днищ с отверстиями при поперечных нагрузках (локальное нагружение при транспортировке и хранении РН). Такое нагружение приводит к появлению локальных вмятин возле краев отверстий в связи с КН. При высоких уровнях нагрузки необходимо учитывать ПД.

Особенности НДС и НДС элементов конструкций РКТ с вырезами и необходимость учета ПД приводит к постановке сложных задач НДС и НДС.

Значительный вклад в разработку методов определения НДС и НДС конструкций РКТ внесли известные ученые А. В. Кармишин, В. И. Моссаковский, П. И. Никитин, И. Ф. Образцов, В. И. Феодосьев и др.

Несмотря на значительное развитие наук о прочности остаются без ответа многие важные вопросы: разработка эффективных вычислительных алгоритмов решения задач НДС и НДС для конструкций с одним или несколькими отверстиями разной формы, учет ПД и исследование взаимодействия отверстий, разработка новых подходов при определении НДС и др.

К наиболее эффективным численным методам решения соответствующих задач относится метод конечных элементов (МКЭ). Основные достижения в разработке МКЭ для расчета тонкостенных конструкций связаны с именами многих ученых. Одной из последних фундаментальных исследований является работа [4].

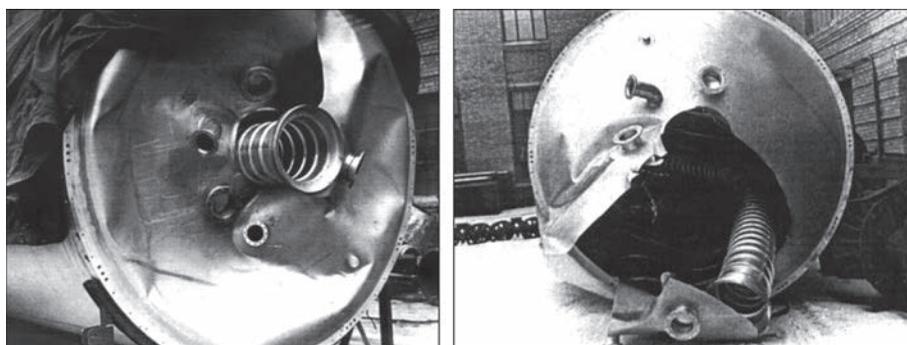


Рис. 1. Бак горючего первой ступени РН «Циклон-3» после контрольно-выборочных испытаний на действие внутреннего давления

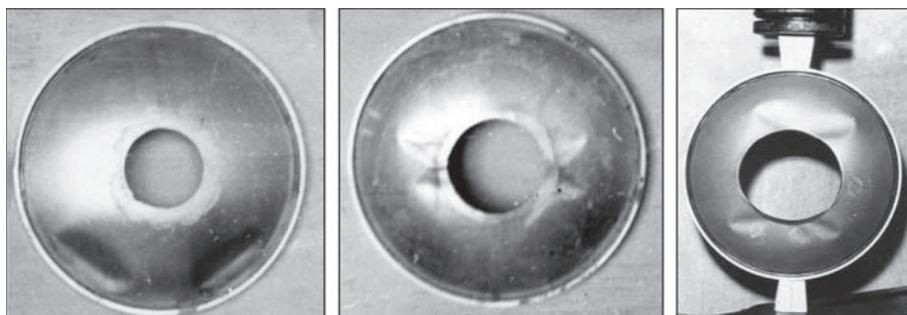


Рис. 2. Вид моделей сферических днищ с отверстиями после испытаний (локальное нагружение от транспортировочных ложементов)



Рис. 3. «Циклон-3» на стартовой позиции (космодром Плесецк) (а), «Зенит-2» на стартовой позиции (Байконур) (б), РН «Антарес» во время успешного пуска с космодрома о. Уоллопс (США) (в)

Особенность применения МКЭ для РКТ заключается в том, что заказчик обычно требует применения лицензионных программ-пакетов (ЛПП). Они определяют начальный и конечный этапы расчетов, но при этом отсутствует возможность их корректировки на промежуточных этапах. Необходимость использования сложных моделей деформирования (пластичность, ползучесть) требует покупки дополнительных дорогостоящих модулей. Это делает целесообразным создание расчетных схем МКЭ, уменьшающих время компьютерных расчетов, что позволяет проводить большое количество расчетов (это важно на этапах проектирования и отработки конструкций РКТ).

Уменьшение времени расчетов для МКЭ связано с созданием ПИ схем его реализации. Основы таких схем заложены в трудах известных ученых-математиков: Л. В. Канторовича, М. А. Красносельского, Г. И. Марчука, А. А. Самарского, Р. Хакбуша и др. При использовании таких схем следует подтверждать их достоверность сравнением с расчетами на основе ЛПП в тестовых задачах.

Рассмотрим типичные конструкции РН. К ним относятся РН «Циклон-3», РН «Зенит», РН «Антарес» – разработка Украины и США (рис. 3) [1].

Конструктивное исполнение ряда «сухих» отсеков показано на рис. 4.

Для разных классов РН характерны конкретные нормы прочности. В них формулируются расчетные случаи и методики расчетов нагрузок, прочно-

сти и коэффициентов безопасности. По сути дела, это стандарты, регламентирующие основы расчетов и испытаний прочности. От норм прочности зависят масса и надежность конструкций РН. При вероятностно-статистическом подходе вероятность неразрушения P элемента конструкции: ($P = P(N - Q > 0)$) (N, Q – случайные величины НС и нагрузки).

Величина P может быть найдена аналитически или статистическим моделированием. Аналитический подход возможен при описании распределения НС нормальным законом.

Укажем, что нормы прочности не содержат требования о необходимости проведения прочностных испытаний до разрушения с целью определения НС. При отработке РН с целью использования материальной части, прошедшей прочностные испытания, допускается снижение уровня максимальной испытательной нагрузки до 90 % расчетной.

Общие численные методы расчета прочности и НС элементов пластинчато-оболочечных конструкций РКТ при наличии КН в виде отверстий на основе ПИ вариантов МКЭ с учетом ПД. Конструкции современной РКТ неоднородные, что обусловлено существованием отверстий (люков), подкреплений (стрингеры, шпангоуты, накладки), различных геометрических несовершенств и др. Это обуславливает актуальность проблем прочности и сложность их решения.

Отверстия (вырезы, люки) являются основными факторами, определяющими неоднородность. Физические аспекты влияния отверстий в основном связаны с возникновением концентрации НДС. К такой концентрации приводят также некоторые нагрузки (локальные, возникающие при контакте элементов конструкций).

Расчет на основе МКЭ связан с разбиением объектов на элементы разной формы и использованием вариационных принципов. При этом строится система линейных алгебраических уравнений высокого порядка с матрицами специального вида.

Для повышения эффективности решения соответствующих задач прочности целесообразно использовать ПИ схемы МКЭ, которые ведут к значительной экономии компьютерного времени

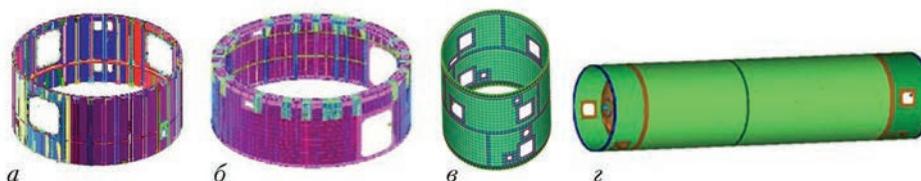


Рис. 4. Переходный отсек первой ступени РН «Циклон-3» (а), приборный отсек РН «Зенит» (б), корпус хвостового отсека вафельного типа (в) и топливный отсек РН «Антарес» (г)

расчета. Основная идея ПИ схем МКЭ для вариационных задач состоит в том, что на основе МКЭ проводится достаточно «грубое» разбиение области, при котором характерный размер конечного элемента h не очень мал. Дискретизированная исходная вариационная задача решается с помощью какого-либо итерационного метода (условного градиента, сопряженных градиентов, последовательной верхней релаксации), причем не до конца, а с построением лишь нескольких k_n приближений к решению. Последнее приближение на данной сетке интерполируется на новую, более мелкую сетку (характерный размер конечного элемента равен при этом $h/2$ и является новым начальным приближением в итерационном процессе. Вычисления на последовательности вложенных КЭ сетках продолжаются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность между соседними приближениями. Такой многосеточный алгоритм значительно ускоряет процесс получения решения (по сравнению с традиционным использованием МКЭ на одной мелкой сетке). При построении ПИ схем используется методика, в которой нет необходимости хранить матрицу жесткости в явном виде, а значения перемещений в текущем узле выражаются через узловое значения перемещений четырех прилегающих к узлу конечных элементов. ПИ схемы МКЭ успешно применялись для решения краевых задач теории упругости, определения НДС пластин и оболочек с различными видами неоднородностей, деформирования сред, содержащих трещины, включения, поры [2, 5–8]. Отметим, что разработка проекционно-итерационных схем важна и для других сеточных методов, в частности, метода локальных вариаций, где проблема уменьшения компьютерного времени расчета является особо острой [9, 10].

Для учета ПД можно использовать различные подходы. Эффективен метод переменных параметров упругости (МППУ). Для деформационной теории пластичности соотношения МППУ имеют вид, аналогичный представленному в теории упругости с переменными модулем сдвига \tilde{G} и коэффициентом Пуассона $\tilde{\nu}$:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\tilde{G}} \left(\sigma_{ij} - \frac{3\tilde{\nu}}{1+\tilde{\nu}} \sigma_0 \delta_{ij} \right), \quad (1)$$

где $\tilde{G} = \tilde{E} / [2(1 + \tilde{\nu})] = 1/(2\psi)$; $\tilde{E} = 3E / (2E\psi + 1 - 2\nu)$; $\tilde{\nu} = (E\psi - 1 + 2\nu) / (2E\psi + 1 - 2\nu)$; $\psi = 3\varepsilon_i / 2\sigma_i$; σ_{ij} и ε_{ij} , σ_i и ε_i – напряжения, деформации их интенсивности; E – модуль упругости; σ_0 – среднее напряжение.

При расчете на основе МППУ используются последовательные приближения, в каждом из которых решается задача теории упругости с пе-

ременными \tilde{G} и $\tilde{\nu}$. Причем для первого приближения принимается $\psi = 1/(2G)$, $\tilde{G} = G$, $\tilde{\nu} = \nu$. В случае решения в напряжениях отыскание параметров НДС для каждого k -го приближения такова: находятся σ_{ij} , σ_i , ε_i упругого тела, из диаграммы деформирования $\sigma_i \sim \varepsilon_i$ находится σ_{ik} для упругопластического тела и вычисляются \tilde{G} , $\tilde{\nu}$ и Ψ_k , используемые в следующем $(k+1)$ -м приближении. В случае решения в перемещениях осуществляется такая последовательность действий: $\varepsilon_{ijk} \rightarrow \varepsilon_{ijk} \rightarrow \sigma_{ik} \rightarrow \Psi_k$. Напряжение σ_{ik} определяется из диаграммы $\sigma_i \sim \varepsilon_i$. Расчет проводится до достижения заданной точности между двумя соседними приближениями при $\tilde{E}_k \approx \tilde{E}_{(k-1)}$. Могут быть построены также схемы расчета на основе теории пластического течения.

Задача нахождения минимума рассматривается как задача условной минимизации [2, 5–8]

$$I[z] \rightarrow \inf, z \in Z, \quad (2)$$

где $I[z]$ – функционал, ограниченный на множестве перемещений Z ; z – вектор-функция перемещений.

Решение задачи НДС для k -го шага последовательных приближений проводится на основе следующего алгоритма:

- применяется ПИ схема МКЭ при решении задачи условной минимизации (2);
- определяется интенсивность деформаций $\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{(1 - \tilde{\nu} + \tilde{\nu}^2)(\varepsilon_x + \varepsilon_y)^2 / (1 - \tilde{\nu})^2 - 3\varepsilon_x \varepsilon_y + 3\gamma_{xy}^2} / 4$.

При $\varepsilon_i \leq \varepsilon_s$, \tilde{G} и $\tilde{\nu}$ остаются теми же; при $\varepsilon_i > \varepsilon_s$ переходим к следующему шагу:

- на диаграмме $\sigma_i > \varepsilon_i$ определяется σ_p , соответствующая ε_i и определяются \tilde{G} и $\tilde{\nu}$ по (1);
- алгоритм реализуется для $k = k + 1$. При $k > 1$ осуществляется проверка следующего условия: вычисление заканчивается, когда для каждого конечного элемента имеем $|\varepsilon_{i,k} - \varepsilon_{i,(k-1)}| < \varepsilon$ (ε – заданная точность вычислений).

Алгоритм решения с использованием ПИ схем МКЭ на последовательности сеток следующий:

- строится сетка для заданных параметров конструкций, параметра релаксации, начального шага h_n сетки и задается начальное приближение для $n = N$;
- на основании построенных шаблонных формул для минимума функций многих переменных и метода последовательной верхней релаксации в каждом узле текущей сетки находится ε_{ij} ;
- выбирается k_n итераций на n -м шаге ПИ процесса как наименьшее число k , которое определяется неравенством $(z_n^{(k)} - z_n^{(k-1)})$ – приближенное решение n -й конечномерной задачи):

$$\|z_n^{(k)} - z_n^{(k-1)}\| \leq \varepsilon; \quad (3)$$

– проводится интерполирование решения для n -й сетки на более мелкую $(n + 1)$ -ю сетку. Это решение используется в качестве начального приближения к точке минимума для соответствующей функции многих переменных (переход на 2-й шаг).

Методы решения ряда задач оценки прочности и ресурса конструкций РКТ при учете взаимовлияния концентраторов напряжений в виде отверстий. Применим разработанную общую методику к решению конкретных задач оценки прочности и ресурса конструкций РН с КН в виде прямоугольных отверстий как наиболее часто встречающихся.

Расчетные формулы определяются при решении задачи минимизации функционала потенциальной энергии. Такие функционалы имеют следующий вид. Для пластинчатых элементов конструкции (прямоугольная пластина)

$$V_1 = \iint_{\Omega} \left\{ \tilde{G} \left[u_{,x}^2 + v_{,y}^2 + 2\tilde{\nu} u_{,x} v_{,y} \right] / (1 - \tilde{\nu}) + \tilde{G} \left(u_{,y} + v_{,x} \right)^2 / 2 \right\} dx dy - \int_{\Gamma} (p_x u + p_y v) d\Gamma, \quad (4)$$

где p_x, p_y – проекции вектора нагрузки на оси Ox, Oy ; u, v – перемещения; Ω, Γ – поверхность и контур пластины; запятые определяют производные по координатам.

Геометрия отсеков РН в виде цилиндрических оболочек с прямоугольными отверстиями такова, что возможно использование теории пологих оболочек, дающей более простые решения, чем общая теория оболочек. Так, для типичной конструкции РН диаметр равен 2,4...3,2 м, а сторона прямоугольного отверстия составляет 0,2...0,4 м. НДС, вызванное концентрацией напряжений, быстро затухает при удалении от краев отверстий. Здесь вполне могут быть использованы соотношения теории пологих оболочек, для которых

$$V_2 = h \iint_{\Omega} \left\{ \tilde{G} \left[u_{,\alpha}^2 + 2\tilde{\nu} u_{,\alpha} \left(v_{,\beta} + w/R \right) + \left(v_{,\beta} + w/R \right)^2 \right] / (1 - \tilde{\nu}) + \tilde{G} \left(u_{,\beta} + v_{,\alpha} \right)^2 / 2 \right\} d\alpha d\beta + h^3 \iint_{\Omega} \left\{ \tilde{G} \left[w_{,\alpha\alpha}^2 + 2\tilde{\nu} w_{,\alpha\alpha} w_{,\beta\beta} + v_{,\beta\beta}^2 \right] / (1 - \tilde{\nu}) + 2\tilde{G} w_{,\alpha\beta}^2 \right\} d\alpha d\beta / 12 - \int_{\Gamma_p} (T_1 u + S_1 v + Q_1 w + M_1 \varphi_1) d\beta, \quad (5)$$

где u, v, w – перемещения оболочки; R, h – радиус и толщина; Ω, Γ_p – поверхность оболочки и граница, на которой действуют краевые усилия и изгибающий момент T_1, S_1, Q_1, M_1 .

Выражения для деформаций, кривизн (для осей α, β) и напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\alpha} &= u_{,\alpha}, \quad \varepsilon_{\beta} = v_{,\beta} + w/R, \quad \omega = u_{,\beta} + v_{,\alpha}, \quad \chi_{\alpha} = -w_{,\alpha\alpha}, \\ \chi_{\beta} &= -w_{,\beta\beta}; \quad \tau_{\alpha\beta} = -w_{,\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_{\alpha} = 2\tilde{G}(\varepsilon_{\alpha} + \tilde{\nu}\varepsilon_{\beta}) / (1 - \tilde{\nu}),$$

$$\sigma_{\beta} = 2\tilde{G}(\varepsilon_{\beta} + \tilde{\nu}\varepsilon_{\alpha}) / (1 - \tilde{\nu}), \quad \sigma_{\alpha\beta} = \tau_{\alpha\beta}.$$

Когда проводится дискретизация задачи на основе МКЭ, область разбивается на прямоугольные конечные элементы, внутри которых искомые функции u, v и w заменяются эрмитовыми функциями, зависящими от узловых значений $u, v, w, w_{\alpha}, w_{\beta}, w_{\alpha\beta}$, в каждой из четырех вершин конечного элемента:

$$\begin{aligned} u(\alpha, \beta) &= a_0 + a_1\alpha + a_2\beta + a_3\alpha\beta; \quad v(\alpha, \beta) = b_0 + b_1\alpha + b_2\beta + b_3\alpha\beta; \quad \omega(\alpha, \beta) = c_0 + c_1\alpha + c_2\beta + c_3\alpha\beta + c_4\alpha^2 + c_5\alpha\beta^2 + c_6\alpha^3 + c_7\alpha^2\beta + c_8\alpha\beta^2 + c_9\beta^3 + c_{10}\alpha^2\beta^2 + c_{11}\beta^3 + c_{12}\alpha^3\beta + c_{13}\alpha^3\beta^2 + c_{14}\alpha^2\beta^3 + c_{15}\alpha^3\beta^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения для входящих в (7) параметров имеют громоздкий вид и здесь не приводятся.

В текущем узле (i, j) перемещения определяются через узловые значения перемещений $(u_1, v_1, w_1, w_{\alpha 1}, u_{\beta 1}, w_{\alpha\beta 1}, \dots, w_8, w_{\alpha 8}, w_{\beta 8}, u_8, v_8)$ четырех прилегающих к данному узлу конечных элементов.

При проведении расчетов разработаны соответствующие шаблонные формулы для перемещений $u, v, w, w_{\alpha}, w_{\beta}, w_{\alpha\beta}$ в текущем узле конечного элемента через узловые значения перемещений указанных четырех конечных элементов.

Численный анализ НДС оболочечных элементов отсеков РН с прямоугольными отверстиями при учете их взаимовлияния. Рассмотрим НДС цилиндрической оболочки с параметрами: длина $L = 1,6$ м, $R = 1$ м, $h = 0,004$ м, из материала Д16Т с прямоугольным отверстием $(0,4 \times 0,4$ м). Величина сжимающей нагрузки p изменялась от 10 до 70 МПа. При таких размерах происходит ПД. Для подкрепленных отсеков вместо h используется приведенная толщина, определяемая через параметры подкреплений и толщину оболочки h .

Разработанный на основе ПИ схем вариант МКЭ реализован на шести вложенных вдвое КЭ сетках из прямоугольных эрмитовых элементов. На рис. 5 показано развитие зон ПД при возрастании p ($p = 25,45, 65$ МПа) (приведены проекции на плоскость развертки оболочки).

Исследуем НДС оболочки из Д16Т с двумя прямоугольными отверстиями разного размера при ПД. Размеры оболочки: $L = 16$ м, $R = 1$ м, $h = 0,004$ м; отверстий $0,2 \times 0,2$ м, $0,4 \times 0,4$ м; $p = 80$ и 90 МПа. На рис. 6 показано развитие зон ПД при увеличении p для расстояния между центрами отверстий $l = 1,2$ м.

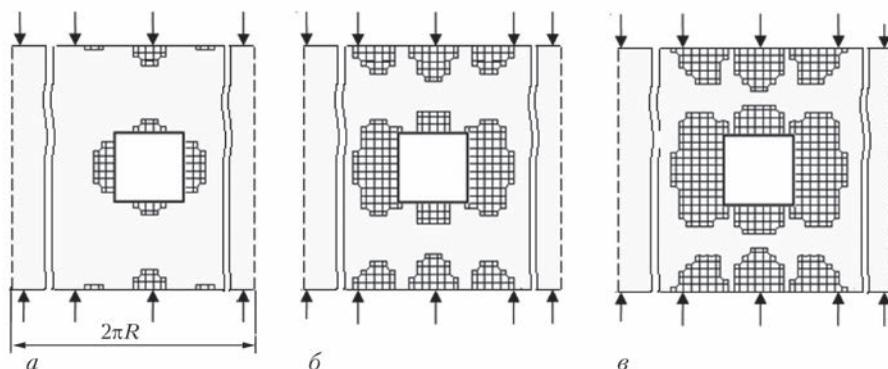


Рис. 5. Развитие зон ПД при возрастании p , МПа: 25 (а); 45 (б); 65 (в)

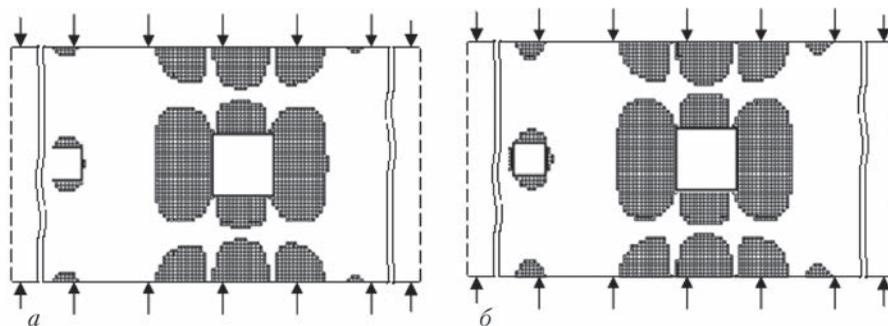


Рис. 6. Развитие зон ПД при $p = 80$ (а) и 90 (б) МПа для расстояния между центрами вырезов $l = 1,2$ м (ПД для данной оболочки начинают появляться при $p = 37$ МПа)

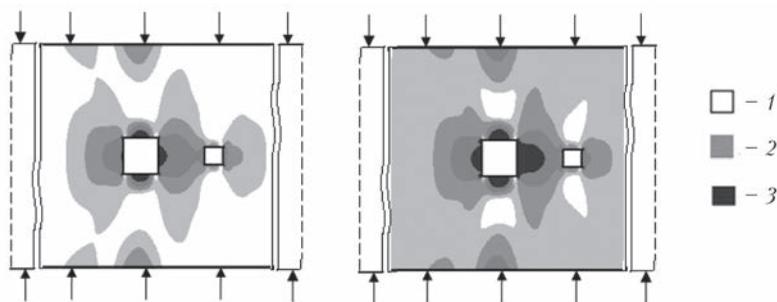


Рис. 7. Величины интенсивности напряжений σ_i для расстояния между прямоугольными вырезами $l = 1$ м; $p = 150$ и 176 МПа: 1 – 159; 2 – 200...250; 3 – 304...355 МПа

На рис. 7 показаны величины интенсивности напряжений σ_i для другого варианта расположения прямоугольных отверстий.

На рис. 8 показаны зоны ПД для трех прямоугольных отверстий.

На рис. 9 показаны интенсивности напряжений для изображенной на этом рисунке схемы расположения трех прямоугольных отверстий.

Проекционно-итерационный вариант МКЭ реализован на пяти вложенных вдвое конеч-

но-элементных сетках (25×97 , 51×193 , 101×385 , 201×769 , 401×1537) из прямоугольных эрмитовых элементов.

Применение ПИ схем МКЭ привело к экономии компьютерного времени расчета в 36...45 раз (в зависимости от рассмотренных задач) по сравнению со временем расчета на основе традиционного МКЭ (на одной сетке).

Варьирование l позволяет исследовать взаимное влияние отверстий, которое зависит от раз-

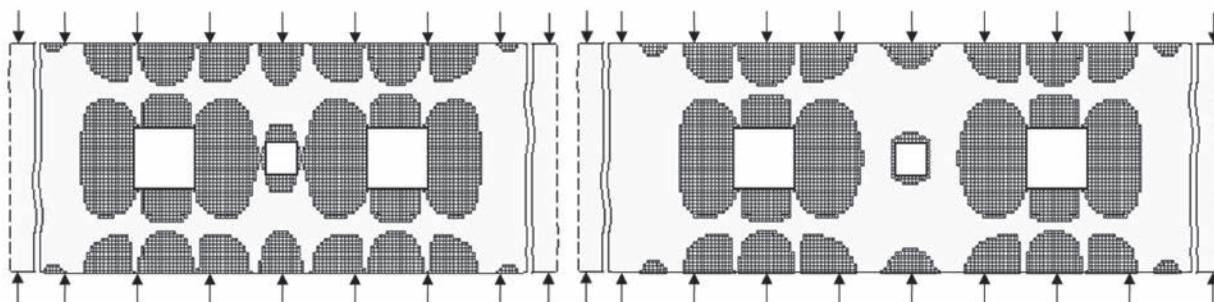


Рис. 8. Зоны ПД для трех прямоугольных отверстий: $p = 90$ МПа; расстояние между вырезами $l = 0,6$ и $0,8$ м

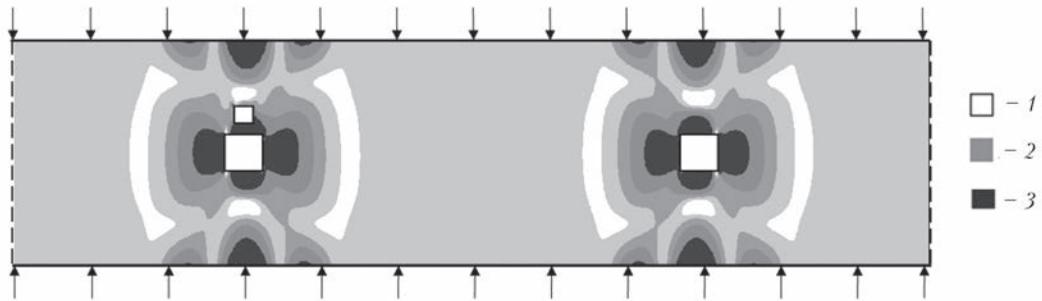


Рис. 9. Интенсивности напряжений σ_i для оболочки с тремя прямоугольными отверстиями при $p = 176$ МПа (1 – 3 – то же, что и на рис. 7)

меров и формы вырезов, механических свойств материала и определяется трансформацией в процессе нагружения областей ПД.

Возникновение ПД приводит к падению жесткостей конструкций, в выражениях, для которых (при сжатии: $2\pi R h E$; при изгибе: $E h^3 / 12(1-\nu^2)$) вместо E появляется приведенный $E_c = \sigma_i / \varepsilon_i$ или касательный $E_k = d\sigma_i / d\varepsilon_i$ модули, которые меньше E .

Величины нагрузок, при которых зоны ПД смыкаются, определяют значительное уменьшение жесткости конструкции. Схемы ПД с учетом взаимовлияния прямоугольных вырезов вследствие наличия общих зон ПД могут использоваться для прогнозирования НС отсеков РН с отверстиями.

Численный анализ влияния подкрепления отверстий. Основным средством уменьшения концентрации НДС является подкрепление краев отверстий. Оно может быть осуществлено накладками из того же, что и основной отсек, или другого материала.

Как указано, НДС конструкций типичных РН вполне описывается соотношениями теории пологих оболочек. Полученные на основе других методов решения показывают, что НДС плоского пластинчатого элемента вполне моделирует НДС пологих оболочек, выявляя основные качественные и количественные особенности влияния подкреплений.

Для исследования влияния подкреплений использованы разработанные ПИ схемы МКЭ. Приведем результаты ЧА по изучению влияния соотношения модулей упругости материала элемента конструкции и подкреплений, которые моделируются опоясывающими прямоугольный вырез угловыми подкреплениями (рис. 10). Наиболее важным при исследовании концентрации НДС является изучение того, как меняется интенсивность ε_i в зависимости от формы подкреплений и соотношений E . Дело в том, что для многих материалов (типа используемых в основном для отсеков РН алюминиево-магниевых сплавов) при

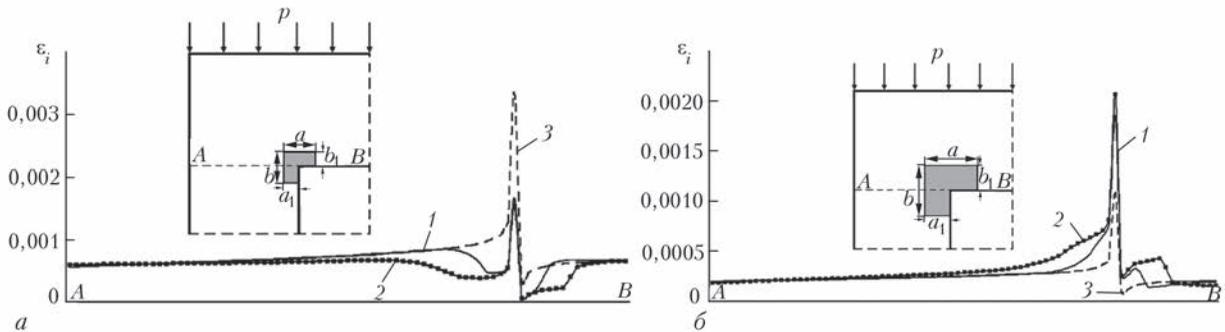


Рис. 10. Распределение интенсивностей деформаций ε_i в сечении $A-B$ элемента конструкции: 1 – для $A/a = A/b = 4$; 2 – для $A/a = A/b = 2$ (позицию 3, а также a, b см. в тексте для рис. 10–12)

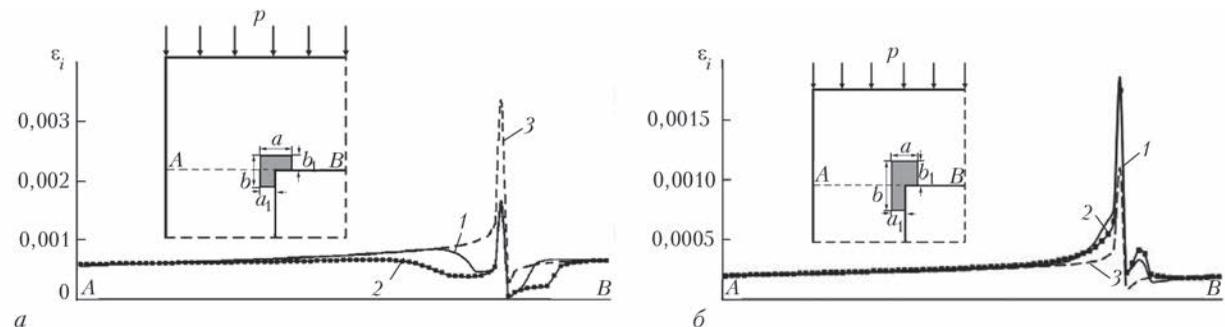


Рис. 11. Распределение ε_i в сечении $A-B$: 1 – $A/a = A/b = 4$; 2 – $A/a = 4, A/b = 2$

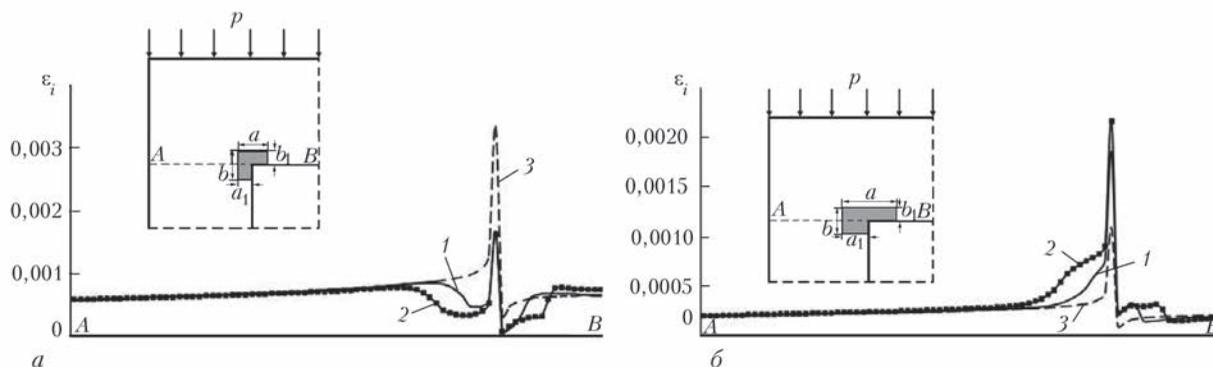


Рис. 12. Распределение ϵ_i в сечении А-В: 1 – $A/a = A/b = 4$; 2 – $A/a = 2$; $A/b = 4$

ПД разница между σ_s и σ_b незначительна ($\sigma_b/\sigma_s \approx 1,2 \dots 1,3$). В то же время разница между ϵ_1 , определяющей разрушение, и ϵ_s велика (в 6 и более раз) и исследование ϵ_1 является более важным для изучения концентрации НДС.

Рассмотрен пластинчатый элемент $0,4 \times 0,4$ м с отверстием $A \times A = 0,08 \times 0,08$ м. На рис. 10–12 показаны результаты ЧА для различных видов опоясывающих углы прямоугольных вырезов подкреплений и различных соотношений E , а также распределения интенсивностей деформаций ϵ_i в сечении А-В для разных соотношений модуля упругости материала элемента конструкции и подкрепления ($E_1/E_2 = 1/3$ – рис. 10, а–12, а; $E_1/E_2 = 3$ – рис. 10, б–12, б; E_1, E_2 – модули упругости пластинчатого элемента и подкрепления) при сжимающей нагрузке $p = 50$ МПа: 3 – для элемента без подкрепления (для всех рисунков); 1 – для элемента с подкреплением (рис. 10, а–12, а); 2 – для пластинчатого элемента с подкреплением (рис. 10, б–12, б). На рис. 10–12 показана четверть пластинчатого элемента (ввиду симметрии НДС); вид подкреплений схематично показан для каждого из рис. 10–12 в верхней части рисунков. Размеры подкреплений характеризуются отношениями: $a_1 = 1/2 a, b_1 = 1/2 b$.

При разработке ПИ расчетных схем взяты эрмитовы конечные элементы. Схемы реализованы на шести вложенных дважды конечно-элементных схемах. Количество приближений на n -м шаге ($n = 1, 2, \dots, 6, 0$) определялось как наименьшее целое, которое удовлетворяет условию (3), где $z_h^{(k,n)}$ – приближенное решение дискретной задачи, точность вычислений на n -й сетке.

На рис. 13 показана характерная схема, определяющая процесс изменения несущей способности при ПД. Точки А, В, С соответствуют началу ПД ($\epsilon_i = \epsilon_y$), слиянию зон ПД, началу деформирования при общих зонах ПД для прямоугольных вырезов.

Соответствующие этим точкам значения несущей способности определяются цифрами 3; 2; 1.

Проведен также численный анализ влияния треугольных подкреплений в углах прямоугольных вырезов и влияния изменения ориентаций

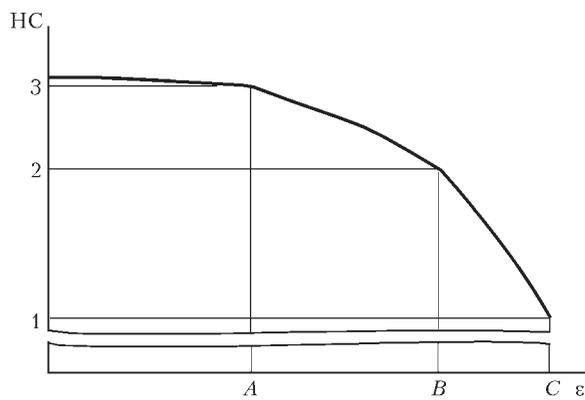


Рис. 13. Схема процесса изменения несущей способности при ПД

вырезов (поворот вырезов в плоскости xOy) при различных соотношениях E_1/E_2 .

Применение ПИ схем МКЭ дает существенное сокращение компьютерного времени расчета по сравнению с расчетом для МКЭ на одной мелкой сетке, который проведен на основе лицензионных пакетов программ ANSYS, NASTRAN. Расчеты проведены для отсеков космической РН «Антарес». Сравнение полученных результатов с расчетами на основе применяемых в ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля методик дает приемлемое совпадение. Результаты этих расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными в ГП «КБ «Южное». Имеется акт внедрения результатов работ по рассмотренному в статье направлению, утвержденный руководством ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля.

Выводы

Проанализированы возможные схемы разрушения оболочечных конструкций РН и конструктивные схемы типичных РН («Циклон-3», «Зенит», «Антарес») с отверстиями-вырезами различной формы, которые являются концентраторами напряжений.

Приведены данные о разработанных проекционно-итерационных схемах МКЭ.

Проведен численный анализ НДС пластинчато-оболочечных элементов конструкций РКТ с отверстиями наиболее распространенной пря-

моугольной формы с учетом пластического деформирования материала и взаимного влияния вырезов.

Проведен анализ влияния опоясывающих углы прямоугольных отверстий подкреплений и угловых треугольных подкреплений, вызывающих снижение концентрации НДС, на прочность пластинчато-оболочечных элементов конструкций РКТ.

Предложена схема прогнозирования несущей способности с учетом возникновения и трансформации зон пластических деформаций в окрестности отверстий-вырезов.

Приведены данные по внедрению полученных результатов для расчета в ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля конкретной РН.

Проанализированы схемы подкреплений отверстий-вырезов, существенно снижающих НДС. Такие подкрепления – основной способ борьбы с концентрацией напряжений и деформаций, что подтверждается результатами экспериментов и обработки конструкции различных РН.

Основные результаты проведенных исследований отражены в работах [3, 5–8, 11].

Разработанные расчетные схемы для определения НДС, основанные на проекционно-итерационных модификациях МКЭ, могут быть успешно использованы для других отраслей техники, в частности, для конструкций теплоэнергетики из железобетона [12].

1. Шестьдесят лет в ракетостроении и космонавтике; под общ. ред. А. В. Дегтярева. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2014. – 540 с.
2. Гудрамович В. С. Моделирование напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций ракетной техники и энергетики / В. С. Гудрамович // Техническая механика. – 2013. – № 4. – С. 97–104.
3. Гудрамович В. С. Влияние отверстий на предельные состояния элементов тонкостенных металлических оболочечно-пластинчатых конструкций / В. С. Гудрамович // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Сер. Механіка. – 2014. – Вип. 18, т. 22. – С. 47–60.

4. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method: Its Basic and Fundamentals / 6-th ed. / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. – Amsterdam / London / NY / Oxford / Paris / Tokyo: Elsevier, 2005. – 722 p.
5. Гудрамович В. С. Применение проекционно-итерационных схем МКЭ к решению задач упругопластического деформирования оболочек с отверстиями / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Вісник Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Сер. Фіз.-мат. науки. – 2013. – Вип. 3. – С. 55–58.
6. Hudramovich V. S. Elastoplastic deformation of nonhomogeneous plates / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, S. A. Ryabokon // J. Eng. Math. – 2013. – 78. – P. 181–197.
7. Hart E. L. Projection-iterative schemes for realization of the finite element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // J. of Math. Sci. – 2014. – 203, № 1. – P. 55–69.
8. Гарт Е. Л. Проекційно-ітераційні схеми реалізації методу скінченних елементів в задачах деформування пластин з отворами та включеннями / Е. Л. Гарт, В. С. Гудрамович // Математичні методи і фізико-механічні поля. – 2013. – 56, № 2. – С. 48–59.
9. Гудрамович В. С. Скінченно-елементні схеми аналізу процесу розсіяного руйнування пружно-пластичних тіл з локальними концентраторами напружень / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: 5-а Міжнарод. конф., червень 2014 р., Львів, Україна: зб. наук. праць / під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2014. – С. 39–42.
10. Гудрамович В. С. Проекционно-итерационная модификация метода локальных вариаций для задач локальной устойчивости сферических оболочек / В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт // Доповіді НАН України. – 2015. – № 8. – С. 35–41.
11. Гарт Э. Л. Проекционно-итерационная модификация метода локальных вариаций для задач с квадратичным функционалом / Э. Л. Гарт, В. С. Гудрамович // Прикладная математика и механика. РАН. – 2016. – 80, Вып. 2. – С. 218–230.
12. Гудрамович В. С. Моделирование та дослідження впливу підкріплень прямокутних отворів на напружено-деформований стан пластини / В. С. Гудрамович, Е. Л. Гарт, С. А. Рябоконт // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур: IX Міжн. наук. конф., вересень 2014 р., Львів, Україна: матер. конф.; під заг. ред. І. О. Луковського, Г. С. Кіта, Р. М. Кушніра. – Львів: Ін-т прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАНУ, 2014. – С. 43–46.
13. Моделирование процесса деформирования пластинчатых элементов железобетонных конструкций объектов теплоэнергетики с использованием метода конечных элементов / В. С. Гудрамович, В. М. Левин, Э. Л. Гарт [и др.] // Техническая механика. – 2015. – № 2. – С. 59–70.

The investigation is dedicated to shell structures of rocket-space equipment with holes which are the main type of stress concentrators at material plastic deformation. Developed projection-iteration schemes of variation-mesh finite element method were used for investigation of stress-strain state. They significantly reduce computer calculation time in comparison with traditional finite element method (using one fine mesh). Developed software became a basis for investigation of the problems of stress-strain state at axial loading of shell-plate elements of the structures taking into account their mutual effect at plastic strain. Corresponding analysis provides for the possibility of selection of geometry of structure elements, holes, their shape and distance between them, loading strategy effecting their carrying capability. Numerical analysis of was carried out for investigation effect of holes supports. A scheme was proposed for prediction of carrying capacity of cells taking into account zones of plastic deformations at loading. Implementation of the results at calculation of specific launch vehicles was carried out. Ref. 12, Figures 13

Keywords: shell structures of rocket-space equipment, holes, plastic deformation, life evaluation procedure, carrying capacity

*Поступила в редакцию
05.04.2016*

УДК 681.518.5:681.786

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ ВО ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Е. В. ШАПОВАЛОВ, В. А. КОЛЯДА, Н. Ф. ЛУЦЕНКО, А. Н. МАНГОЛЬД

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

Разработан опытный образец системы для автоматизированного бесконтактного контроля технического состояния колесных пар железнодорожных вагонов. Система предназначена для лазерно-триангуляционного измерения профилей рабочей поверхности вагонных колес и оценивания степени их износа непосредственно в процессе движения поездов. Результаты контроля могут использоваться для принятия решений о необходимости проведения ремонта колесных пар или вывода их из эксплуатации с целью обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта. Библиогр. 9, рис.8.

Ключевые слова: колесные пары, железнодорожные вагоны, автоматизированный контроль, геометрические параметры, лазерно-триангуляционный сенсор, сенсорные блоки

Железнодорожный транспорт является одной из важнейших составляющих транспортно-дорожного комплекса. Отсутствие резерва пропускной способности железных дорог диктует повышенные требования к надежности и безопасности движения поездов. Для обеспечения этих требований необходим переход к эксплуатации и техническому обслуживанию подвижного состава по результатам оперативного контроля наиболее важных параметров, которые определяют действительное техническое состояние отдельных узлов. Колесные пары являются одними из важнейших элементов в конструкции железнодорожного транспорта, которые подлежат значительным механическим нагрузкам и влияют на характеристики движения каждого локомотива или вагона. При взаимодействии рельсовой колеи и подвижного состава возникают напряжения в точках контакта колес с рельсами, которые приводят к износу поверхностей трения, а также к их упругим и пластическим деформациям [1]. При достижении установленных величин износа или при появлении повреждений колес необходимо изымать такие колесные пары из эксплуатации для ремонта или утилизации. Несвоевременное выявление дефектов колесных пар является причиной чрезмерного износа верхнего строения пути и может приводить к сходу подвижного состава с рельсов, особенно на стрелочных переводах.

В Украине контроль геометрических параметров колесных пар чаще всего выполняется путем визуального осмотра или измерения отдельных параметров с помощью ручного измерительного инструмента [2]. Как следствие, результаты такого контроля имеют низкую достоверность, поскольку

ку в значительной мере зависят от человеческого фактора. В последнее время на железных дорогах многих стран начали активно применяться бесконтактные средства оперативного контроля геометрических параметров поверхности катания колесных пар вагонов, которые способны определять параметры изношенности колес непосредственно во время движения поездов [3, 4]. Такой подход позволяет существенно повысить качество и повторяемость результатов контроля за счет полной или частичной автоматизации процесса. Вместе с тем, бесконтактное диагностическое оборудование зарубежного производства нуждается в доработке под нормы и условия железных дорог Украины, имеет значительную начальную стоимость и требует существенных дополнительных эксплуатационных затрат. Поэтому разработка импортозамещающего оборудования, предназначенного для бесконтактного контроля технического состояния колесных пар в процессе движения поездов, является важной и актуальной задачей.

Характеристики колесных пар вагонов как объектов оперативного контроля. В настоящее время применяются два основных типа колесных пар, которые отличаются способом торцевого крепления подшипников. Внешняя поверхность (поверхность катания) вагонных колес имеет специальный профиль, который состоит из гребня, основной и боковой поверхностей, а также торцевой фаски. Гребни направляют движение колес вдоль колеи и предотвращают сход колесных пар с рельсов. Как показывает мировой опыт, для оперативного контроля геометрических параметров колесных пар наиболее целесообразно применять системы технического зрения (СТЗ), функциони-

рующие в соответствии с методом лазерной триангуляции [5]. Такие СТЗ за один рабочий такт способны измерять профиль рельефа поверхности объекта в плоскости, которая совпадает с плоскостью излучения лазера. В случае вагонных колес за один рабочий такт СТЗ может получать полные профили их рабочей поверхности в одном фиксированном сечении. Это ограничивает возможный перечень контролируемых параметров, но в то же время позволяет контролировать такие важные параметры колесных пар, как толщина, высота, крутизна гребня, толщина и ширина обода колес (рис. 1).

В качестве толщины гребня принимается расстояние, измеренное по горизонтали на высоте 10 мм от поверхности круга катания колеса между двумя точками, которые лежат по разные стороны от вершины гребня, одна из которых принадлежит плоскости внутренней грани обода, а другая находится на внешней поверхности гребня. В свою очередь, круг катания колеса находится на расстоянии 70 мм от плоскости внутренней грани обода. Высота гребня – это расстояние, измеренное по вертикали между вершиной гребня и поверхностью круга катания колеса. Разность между измеренной и номинальной высотой гребня характеризует величину равномерного проката по кругу катания колеса, который возникает в процессе эксплуатации. Толщина обода колеса измеряется по вертикали между точкой на поверхности круга катания колеса и точкой, которая углублена на 10 мм относительно плоскости внутренней грани обода. Ширина обода – это расстояние по горизонтали между плоскостями внешней и внутренней граней колеса. Параметр, который определяет крутизну гребня, применяется для обнаружения дефекта типа «подрез гребня», который определяется на высоте 18 мм от круга катания колеса. Также лазерно-триангуляционная СТЗ дает возможность определять расстояние между внутренними поверхностями колес, которое относится к

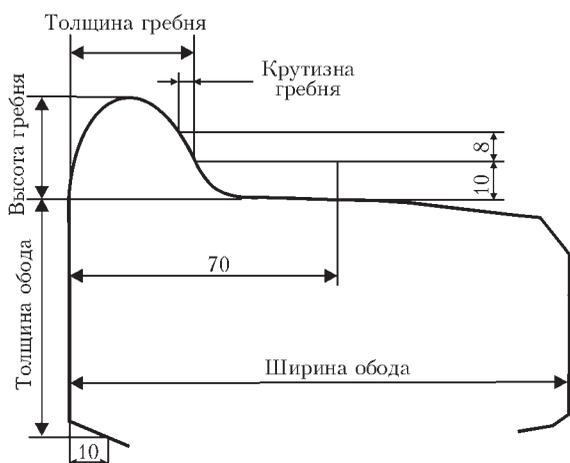


Рис. 1. Геометрические параметры рабочей части вагонного колеса

жестко регламентированным параметрам колесной пары.

Структура системы автоматизированного контроля технического состояния колесных пар. Для измерения рассмотренных выше параметров колесных пар необходимо получать полный профиль рабочей поверхности каждого из колес, что невозможно сделать с одной точки наблюдения. Поэтому в состав технических средств системы должны входить два отдельных измерительных канала, каждый из которых должен состоять из двух сенсорных блоков. Момент получения профилей необходимо синхронизировать с появлением колеса в рабочей зоне лазерно-триангуляционных сенсоров, т. е. в состав каждого измерительного канала также должен входить быстродействующий датчик приближения колеса. Результаты измерения профилей нужно передавать на удаленное автоматизированное рабочее место оператора, которое может быть построено на базе промышленного или мобильного компьютера. Обобщенная структурная схема системы автоматизированного контроля технического состояния колесных пар приведена на рис. 2.

В структуру системы добавлен датчик D_n , который устанавливается на некотором расстоянии от позиции контроля и позволяет автоматически переводить систему из режима ожидания в основной рабочий режим при приближении поезда. Предложен следующий принцип работы измерительных каналов (на примере канала 1). При приближении колеса срабатывает датчик $D_{к1}$, сигнал от которого передается контроллеру сбора данных КСД₁. При этом контроллер КСД₁ формирует синхронизирующие импульсы для сенсорных блоков СБ₁₁ и СБ₁₂. После этого выполняется регистрация цифровых изображений и их предварительная об-

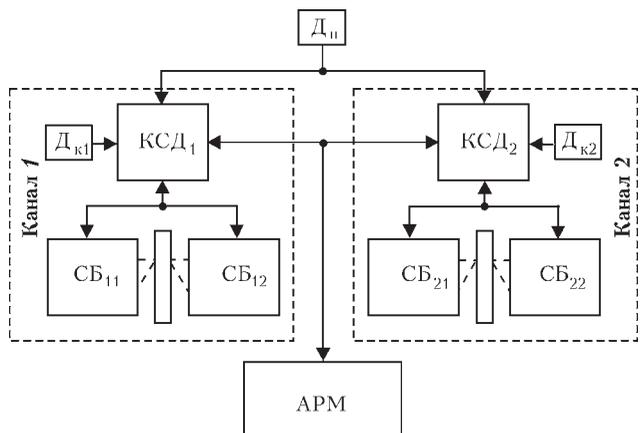


Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы автоматизированного контроля технического состояния колесных пар вагонов: D_n – датчик приближения поезда; $D_{к1}$, $D_{к2}$ – датчики приближения колес; СБ₁₁, СБ₁₂ и СБ₂₁, СБ₂₂ – сенсорные блоки измерительных каналов 1 и 2 соответственно; КСД₁ и КСД₂ – контроллеры сбора данных; АРМ – удаленное автоматизированное рабочее место оператора

работка, при которой выполняется распознавание полного профиля рабочей поверхности колеса. Полученный профиль сразу же передается удаленному рабочему месту оператора АРМ, где выполняется его окончательная обработка, определяются и анализируются геометрические параметры вагонного колеса. Расстояние между внутренними гранями колес вычисляется после получения профилей от измерительных каналов 1 и 2.

Имитационное моделирование процесса формирования исходных сигналов. Основная цель имитационного моделирования состоит в определении оптимальной оптической схемы для сенсорных блоков системы. Поэтому в программную среду имитационного моделирования достаточно внедрить модели объекта контроля, видеокамер и лазерных модулей. На взаимное положение оптических элементов системы накладываются ограничения, связанные с требованиями, которые касаются допустимых габаритов приближения сооружений к железнодорожному пути [6]. Как правило, модель видеокамеры входит в состав среды трехмерного моделирования. Для создания модели видеокамеры достаточно просто выбрать ее прототип и задать параметры модели. В свою очередь, модель лазерного модуля, формирующего световую секущую плоскость, не относится к стандартным элементам, но такую модель несложно построить с помощью встроенных функций [7]. Для удобства желательно дополнить модели видеокамер и лазерных модулей собственными графическими объектами, поскольку они являются программными элементами без графических прототипов. Положение каждого из элементов модели задается трехмерными координатами и углами поворота вокруг координатных осей (рис. 3, а). Модели лазерных модулей формируют на поверхности объекта (колеса) световой след, который повторяет рельеф его поверхности. Соответственно, модели видеокамер способны формировать изображения, которые зависят от заданного взаимного размещения элементов модели и фокусного расстояния объектива (рис. 3, б). Изображения проекций светового следа, которые регистрируются моделями видеокамер, позволяют оценивать качество исходного сигнала и выбирать оптимальное взаимное размещение оптических компонентов сенсорных блоков.

В результате проведения имитационного моделирования выбрана оптическая схема, которая удовлетворяет требованиям по размещению компонентов сенсорных блоков относительно рельсов и позволяет получать информативные начальные сигналы (рис. 4). В соответствии с предложенной схемой оси визирования видеокамер расположены в плоскости, которая перпендикулярна направлению движения колес, и направлены вверх под углом 35° . Угол между видеокамерами и лазерными модулями во фронтальной плоскости выбран равным 40° . Точка измерения вынесена относительно точки контакта колесо–рельс на расстояние, которое обеспечивает световое сечение колеса лазерной плоскостью по его радиусу. При этом рельс, который в данном случае является помехой, выводится из поля зрения видеокамер. Видеокамеры и лазерные модули находятся на значительном расстоянии от боковых поверхностей рельсов (> 200 мм) и от верха головок рельсов (80 мм), что полностью отвечает требованиям к допустимому приближению габаритов сооружений. Также уста-

татами и углами поворота вокруг координатных осей (рис. 3, а). Модели лазерных модулей формируют на поверхности объекта (колеса) световой след, который повторяет рельеф его поверхности. Соответственно, модели видеокамер способны формировать изображения, которые зависят от заданного взаимного размещения элементов модели и фокусного расстояния объектива (рис. 3, б). Изображения проекций светового следа, которые регистрируются моделями видеокамер, позволяют оценивать качество исходного сигнала и выбирать оптимальное взаимное размещение оптических компонентов сенсорных блоков.

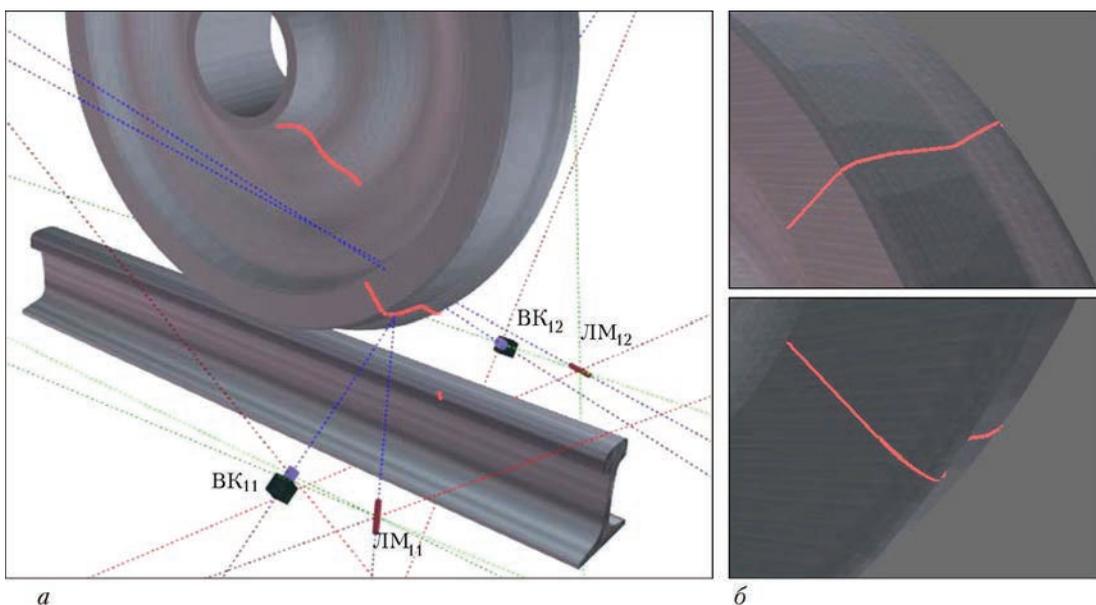


Рис. 3. Имитационная модель процесса лазерно-триангуляционного сканирования профиля рабочей поверхности вагонного колеса: а – моделирование взаимного размещения видеокамер и лазерных модулей BK_{11} , BK_{12} и $ЛМ_{11}$, $ЛМ_{12}$ сенсорных блоков $СБ_{11}$ и $СБ_{12}$ соответственно; б – изображения проекций светового следа, полученные с помощью моделей видеокамер

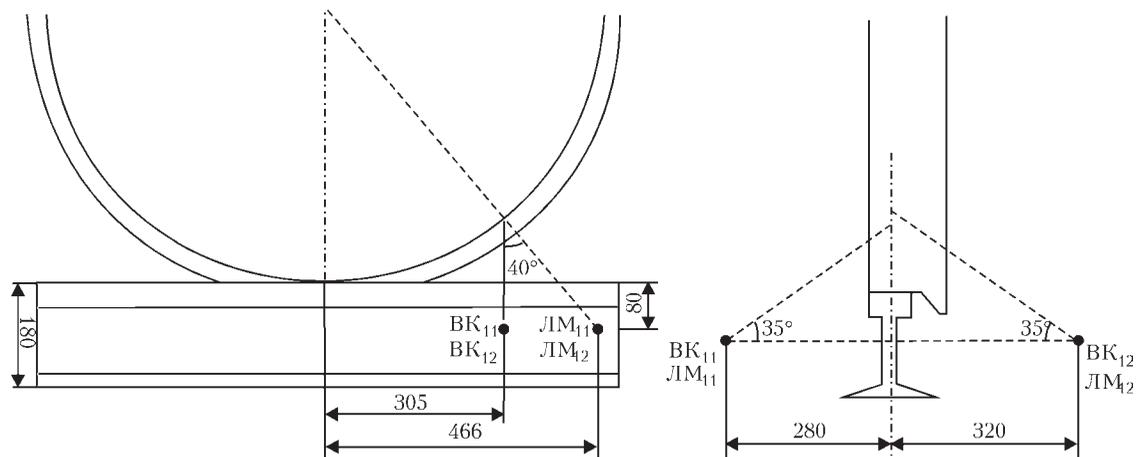


Рис. 4. Оптическая схема сенсорных блоков системы бесконтактного контроля технического состояния колесных пар: BK_{11} , BK_{12} – видеокамеры; LM_{11} , LM_{12} – лазерные модули

новлено, что при такой оптической схеме наиболее целесообразно применять объективы видеокамер с фокусным расстоянием 8 мм и лазерные модули с углом раскрытия 40° .

Разработка аппаратного обеспечения и механических узлов сенсорных блоков. При разработке конструкции сенсорных блоков применена схема двойных корпусов, при которой лазерно-триангуляционные сенсоры и другие электронные компоненты собираются в собственных герметичных корпусах, которые, в свою очередь, устанавливаются внутри корпусов большего размера, непосредственно контактирующих с внешней средой. Такая схема позволяет защитить оптико-электронные компоненты и обеспечить их работоспособность даже в случае попадания пыли и влаги внутрь внешних защитных корпусов сенсорных блоков.

Разработана конструкция внешнего и внутреннего лазерно-триангуляционных сенсоров, которые предназначены для установки снаружи и внутри рельсовой колеи соответственно. В качестве микропроцессорного оборудования сенсоров применены модули видеокамер МТ9М, контроллеры видеокамер CamContol548 и контроллеры сбора данных DAQ532 производства ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Стандартные лазерные модули от зарубежного производителя были доработаны путем установки специальной цилиндрической линзы для развертывания лазерного луча в плоскость. Конструкция модулей видеокамер предусматривает фиксацию интерференционных светофильтров между матрицей фотоприемника и объективом. Светофильтры, полоса пропускания которых согласована с длиной волны излучения лазеров, применяются для подавления внешних оптических помех. Перед лазерными модулями и видеокамерами предусмотрены оптические окна-иллюминаторы. Корпуса сенсоров закрываются крышками через резиновые прокладки, что обеспечивает их защиту от проникновения пыли и влаги на уровне, не ниже IP64.

Конструкция и компоновка сенсорных блоков разработаны исходя из требований относительно допустимого приближения оборудования к рельсам и ограничений, которые накладываются принятой оптической схемой сенсорной системы (рис. 5). Защитный корпус внутреннего сенсорного блока состоит из двух основных деталей: основной части 1, которая имеет прямоугольную форму, и верхней защитной панели 2 с наклонными краями. На передней панели корпуса находятся два отверстия, для открывания/закрывания которых предусмотрена защитная шторка 3. Лазерно-триангуляционный сенсор 4 устанавливается на специальном кронштейне, который обеспечивает необходимую ориентацию оптических осей видеокамеры и лазерного модуля (под углом 35°). На одной из боковых панелей корпуса размещены разъемы 5, предназначенные для подключения источника электропитания, внешнего сенсорного блока, компьютера автоматизированного рабочего места оператора, датчиков приближения колеса и поезда. Внутри возле противоположной боковой панели расположен нагреватель 7, оснащенный радиатором и предназначенный для подогрева воздуха внутри сенсорного блока при низких температурах. На задней панели корпуса устанавливается вентилятор с пылевым фильтром в сборе 6, который применяется для охлаждения аппаратуры и принудительного обдува выходных окон с целью недопущения проникновения пыли внутрь корпуса при открытой защитной шторке. Для фиксации датчика приближения колеса 8 снаружи корпуса предусмотрен угловой кронштейн. Также внутри корпуса устанавливается блок реле 9, электронные компоненты которого размещены в отдельном корпусе. Электропривод защитной шторки 10 крепится к нижней панели сенсорного блока. Для фиксации сенсорного блока на консоли предусмотрены четыре отверстия под болтовые крепления. Внешний сенсорный блок имеет подобную конструкцию за исключени-

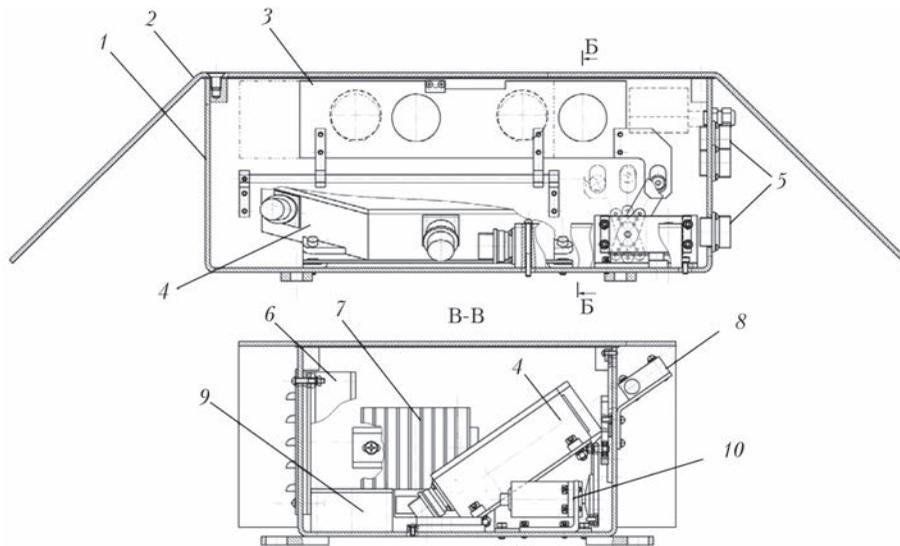


Рис. 5. Схема компоновки внутреннего сенсорного блока: 1 – основной корпус; 2 – верхняя защитная панель; 3 – защитная шторка; 4 – лазерно-триангуляционный сенсор; 5 – разъемы; 6 – вентилятор; 7 – нагреватель; 8 – датчик приближения колеса; 9 – блок релейный; 10 – электропривод механизма защитной шторки

ем компонентов, которые не входят в его состав (датчика приближения колеса и блока релейного).

Для установки сенсорных блоков на рельсовой колее разработана специальная консоль, на которой предусмотрены резьбовые отверстия под винтовые соединения. Консоль крепится к железнодорожным рельсам с помощью специальной системы креплений с изолирующими элементами, которые, с одной стороны, обеспечивают фиксированное положение сенсорных блоков относительно рельсовых нитей, а с другой – не допускают электрического замыкания рельсов.

Математическое обеспечение системы. Разработано математическое обеспечение для контроллеров видеокамер, контроллеров сбора данных и компьютера автоматизированного рабочего места оператора. Основное назначение контроллера видеокамеры – получение цифровых изображений от матрицы фотоприемника и их обработка для распознавания контура светового следа, который повторяет рельеф рабочей поверхности вагонного колеса. Для нахождения точек светового следа разработан алгоритм обработки изображений, который основан на применении одномерного согласованно-избирательного фильтра [8]. Результатом распознавания контура светового следа является массив двумерных дискретных точек, координаты которых заданы в виде номеров строк и строк изображения (в экранных координатах).

Математическое обеспечение контроллера сбора данных выполняет следующие основные функции: формирование сигнала синхронизации видеокамер в момент срабатывания датчика приближения колеса, получение контуров от двух контроллеров видеокамер, преобразование экранных координат точек контуров в опорную метрическую систему координат; обработка контуров

для определения геометрических параметров колесных пар и передача результатов обработки на автоматизированное рабочее место оператора. Также реализовано выполнение вспомогательных функций, связанных с управлением средствами температурной стабилизации и механизмом открывания/закрывания защитных шторок. Преобразование между экранными и метрическими координатами точек контура базируется на применении математической модели оптической системы, которая описывает взаимную связь между видеокамерой, объектом и его изображением [9]. Для определения геометрических параметров колесных пар применены алгоритмы поиска координат характерных точек, которые соответствуют принятой методике измерения параметров гребня и обода вагонных колес.

Основные задачи, которые возложены на математическое обеспечение автоматизированного рабочего места оператора, состоят в реализации следующих функций: обмен командами и данными с контроллерами сбора данных сенсорных блоков, сохранение, просмотр и анализ полученных результатов измерений, визуальное сопровождение процесса контроля, управление исполнительными механизмами сенсорных блоков, мониторинг состояния оборудования и формирование отчетных документов. Для выполнения всех необходимых функций создано специализированное программное обеспечение АРМ, главное диалоговое окно которого имеет три основные области (рис. 6). В верхней области расположены две графические панели, предназначенные для отображения полученных профилей рабочих поверхностей левого и правого колес. Также на панели выводятся найденные характерные точки, относительно которых вычисляются

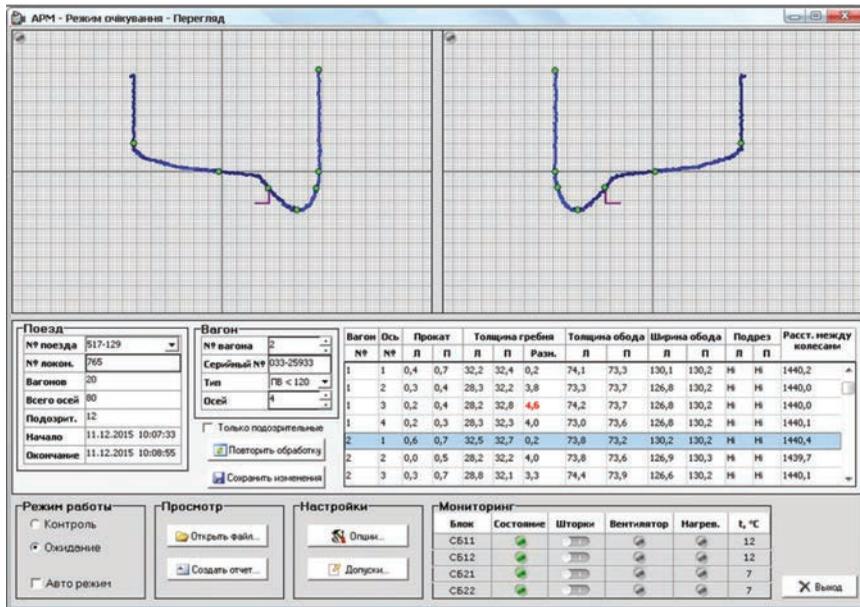


Рис. 6. Главное диалоговое окно программного обеспечения АРМ

ся геометрические параметры колес, и имитаторы шаблона для проверки профилей на наличие дефекта типа «подрез гребня». Средняя область предназначена для просмотра и редактирования числовой и символьной информации. Панель «Поезд» и «Вагон» содержат поля, предназначенные для индикации и редактирования данных о составе и каждом из его вагонов соответственно. Правая панель средней области главного диалогового окна предназначена для вывода полученных геометрических параметров колес в табличном виде. Нижняя область диалогового окна предназначена для реализации функций управления режимом работы системы («Ожидание» или «Контроль»), просмотра результатов контроля, настройки системы и мониторинга состояния оборудования. Предусмотрено формирование отчетных документов в виде ведомостей контроля и их вывод на печать или сохранение в файл.

Экспериментальное исследование процесса бесконтактного автоматизированного контроля геометрических параметров колесных пар. Для проведения экспериментов в соответствии с разработанной рабочей конструкторской документацией были изготовлены компоненты опытного образца оборудования системы автоматизированного бесконтактного контроля колесных пар. Корпуса лазерно-триангуляционных сенсоров и внутренние крепления оптических и электронных компонентов изготовлены из конструкционного алюминиевого сплава с применением фрезерного станка с числовым программным управлением, что позволило получить высокую точность обработки деталей ($\pm 0,1$ мм). Изготовлены корпусные элементы четырех сенсорных блоков и консоль для их фиксации. Основные корпусные детали сенсорных блоков и

верхние защитные панели изготовлены из конструкционной стали толщиной 4 мм, что обеспечивает высокую прочность корпусов и стойкость к возможным внешним ударам. Для предварительного оценивания точности измерения геометрических параметров вагонных колес использовался тестовый стенд, состоящий из полного комплекта оборудования системы и образцов частей (секторов) вагонных колес (рис. 7). Абсолютные погрешности серии измерений в статическом режиме определялись путем сравнения действительных и измеренных значений геометрических параметров при номинальном положении колеса относительно сенсорных бло-

ков. Получено, что в статическом режиме средние погрешности измерения геометрических параметров вагонных колес $\Delta_{ст}$ не превышают $\pm 0,2$ мм (рис. 8, а).

Возникновение динамических погрешностей связано со смещением точки измерения вдоль колеи в зависимости от скорости движения поезда. Согласно сформированным исходным техническим требованиям максимальная скорость движения через позицию контроля ограничена на уровне 60 км/ч. Паспортное время реакции датчика приближения колеса не превышает 330 мкс, т.е. при изменении скорости движения от 0 до 60 км/ч точка измерения за 330 мкс может сместиться максимум на 5,5 мм. Поэтому динамические погрешности оценивались путем сравнения результатов измерений геометрических параметров колеса при его номинальном положении с

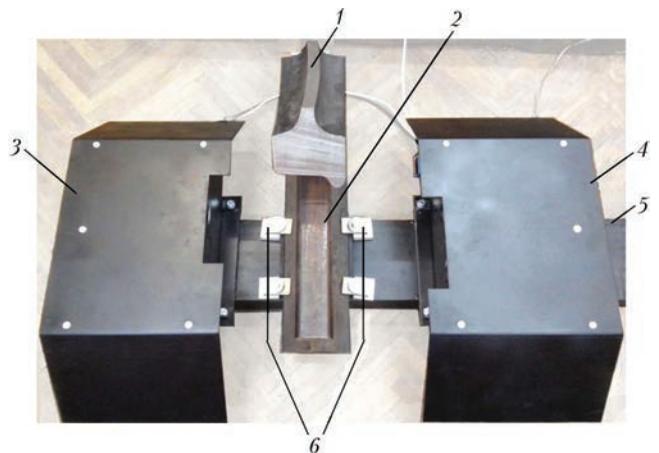


Рис. 7. Тестовый стенд: 1 – образец сектора вагонного колеса; 2 – рельс; 3, 4 – внешний и внутренний сенсорные блоки соответственно; 5 – консоль для фиксации сенсорных блоков; 6 – крепления с изолирующими элементами

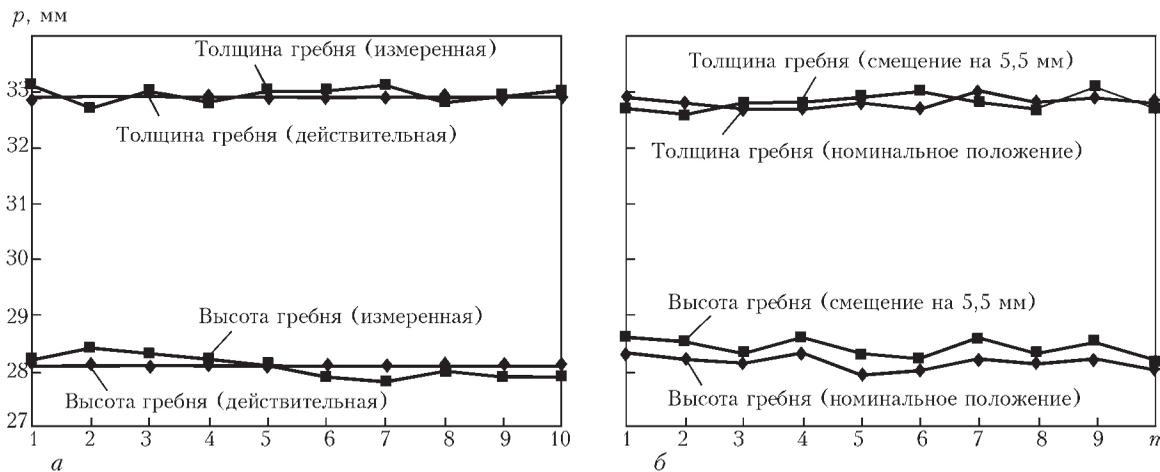


Рис. 8. Результаты оценивания статических (а) и динамических (б) погрешностей измерения геометрических параметров гребня вагонного колеса

результатами измерений, полученными при смещении колеса на 5,5 мм вдоль колеи. Получено, что в динамическом режиме средние погрешности измерений геометрических параметров вагонных колес Δ_d не превышают $\pm 0,3$ мм, причем наибольшие значения погрешностей характерны при измерении параметров, которые относятся к радиальным размерам колеса, т. е. толщины обода и высоты гребня (рис. 8, б). Это связано с тем, что при смещении точки измерения плоскость лазерного излучения не совпадает с направлением радиуса колеса. Таким образом, общие средние погрешности серии измерений $\Delta_{ст} + \Delta_d$ не превышают $\pm 0,5$ мм, что соответствует требованиям к необходимой точности измерения геометрических параметров колесных пар (не хуже ± 1 мм).

Выводы

Предложенные технические решения имеют инновационный характер для железных дорог Украины, поскольку на сегодня параметры изношенности колесных пар вагонов в основном выборочно контролируются с помощью ручного измерительного инструмента при остановке поездов на станциях. Внедрение систем автоматизированного бесконтактного контроля технического состояния колесных пар в отечественное путевое хозяйство позволит существенно улучшить количественные и качественные показатели контроля геометрических параметров вагонных колес и даст возможность повысить безопасность движения на желез-

ных дорогах за счет своевременного выявления опасных дефектов колесных пар.

1. Буряк С. Ю. Диагностирование состояния поверхности катания колеса подвижного состава железных дорог / С. Ю. Буряк // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. – 2013. – Вып. 1. – С. 22–29.
2. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар [Текст]: ЦВ-ЦЛ-0062. – затв. «Укрзалізниця» 01.04.05. – вид. офіц. – К.: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2006. – 102 с.
3. WheelView (S/F/D/I). Accurate, Rugged, Reliable, Automatic Wheel Profile Measurement System [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.beenavigation.com/products_wheelview.html#.
4. Measuring Equipment. E.V.A (Artificial Vision Wheelset Parameter Equipment) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.talgo.com/index.php/en/medida.php>.
5. Демкин В. Н. Лазерные методы и средства контроля геометрических размеров изделий [Текст] / В. Н. Демкин, В. А. Степанов // Измерительная техника. – 2008. – № 2. – С. 32–35.
6. ГОСТ 9238–83, MOD: ДСТУ Б В.2.3-29:2011. Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) мм. – Затверджено: Мінрегіон України, наказ від 30.12.2011 р. № 464.
7. Коляда В. А. Трехмерное моделирование как инструмент проектирования систем технического зрения / В. А. Коляда // Электронное моделирование. – 2012 – 34, № 6. – С. 107–114.
8. Фурман Я. А. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передерев [и др.]; под ред. Я. А. Фурмана. – [2-е изд., искр.] – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2003. – 592 с.
9. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration / Z. Zhang // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – 22, № 11. – P. 1330–1335.

Pilot model of a system for automated contract-free examination of technical conditions of railway car wheel pair was developed. The system is designed for laser-triangulation measurement of profiles of working surface of car wheels and estimation of level of their wear-out directly in the process of train movement. The results of testing can be used for decisions on repair of wheel pairs or removing them from operation for safe movement of railway transport. Ref.9, Figures 8.

Keywords: wheel pair; railway cars, automated testing, geometry, laser-triangulation sensor; sensor blocks

Поступила в редакцию
23.02.2016

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИННЫХ РАЗРУШЕНИЙ СТЕНКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ С ПОВЫШЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

А. Ю. БАРВИНКО, Ю. П. БАРВИНКО

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

Экспериментально в условиях циклического нагружения специальных образцов со стыковым сварным соединением получена зависимость скорости развития усталостной трещины по толщине сварного вертикального соединения стенки резервуара и сквозной трещины на начальном этапе ее развития от количества циклов нагружения. Нагружение образцов соответствовало работе сварных соединений стенки резервуаров для хранения нефти. Образцы изготовлены с листовой стали 09Г2СЮч-У390, $t = 22$ мм, $KCV_{-40} \geq 80$ Дж/см². Показано, что использование для стенки стали с высокими значениями ударной вязкости позволяет визуально выявлять (по нефтяному пятну) образовавшуюся в стенке сквозную трещину, что исключает возможность ее лавинного разрушения.

Ключевые слова: резервуары для хранения нефти, сталь с повышенной вязкостью, развитие вязкой трещины, предотвращение лавинных разрушений

В течение последнего десятилетия произошло обновление ведущих стандартов на устройство вертикальных стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [1–3]. В новых стандартах существенно конкретизированы в сторону ужесточения требования к конструкции стенки резервуара, к свойствам листовых сталей. В частности, нормы [2, 3] дополнены требованием к листовым сталям о выполнении отношения $\sigma_t / \sigma_b \leq 0,75$ при $\sigma_t \leq 440$ МПа и отдельным параграфом указаний относительно проектирования резервуаров с защитной стенкой. В последние годы резервуары с защитной стенкой ($V = 50 \dots 75$ тыс. м³) широко применяются при реконструкции действующих резервуарных парков [4]. С целью повышения их надежности в нормативные документы [2, 3, 5] введено требование о необходимости предусматривать конструктивные мероприятия для предотвращения лавинных разрушений и полного раскрытия стенки рабочего резервуара. Разъяснения, что собой представляют мероприятия, в нормах отсутствуют. Возможность лавинного (стремительного) вязкого разрушения стенки рабочего резервуара рассмотрена авторами в работе [6]. Показано, что предлагаемые [7] конструктивные мероприятия в виде устройства на нижних поясах стенки двух-трех бандажей (на каждом поясе) не могут обеспечивать требуемой работоспособности стенки. Более перспективно достижение достаточной работоспособности стенки внутреннего резервуара путем применения новых

сталей с повышенными вязкими свойствами и обеспечением высокого качества ее сварных соединений. Данное направление уже успешно опробовано при строительстве резервуаров с защитной стенкой [4]. Применение качественной нормализованной листовой стали класса прочности С390 и С420, имеющей показатели $KCV_{-40} > 80$ Дж/см² и сварных соединений с равноценными основному металлу механическими характеристиками создало основу для разработки научного обоснования возможности предотвращения лавинного разрушения стенки резервуара, выполненной с указанных сталей.

Лавинные разрушения характерны для протяженных емкостных конструкций, наполненных газообразной средой под давлением. Типичный их представитель – магистральные газопроводы диаметром 800...1400 мм при толщине стенки 16...24 мм и давлением транспортируемого газа 5,5...12,0 МПа. Возникшая в продольном сварном стыковом соединении стенки трубы макротрещина в условиях циклического нагружения стенки транспортируемым газом со временем достигает критического размера, равного для газопроводов $2i_{кр} \approx 250 \dots 350$ мм [8]. Под действием давления сжатого газа трещина начинает раскрываться, и в вершине вязкой трещины при критическом угле раскрытия берегов образуется бегущая зона пластического течения, в которой металл последовательно течет, упрочняется и разрушается. Движущей силой бегущей зоны (трещины) на данном этапе будет упругая энергия истекающего из тру-

бы газа. При применяемых для стенки трубы значениях $KCV = 60 \dots 120$ Дж/см² вязкое разрушение распространяется в продольном направлении трубы со скоростью 60...250 м/с. При достижении трещиной эффективной максимальной длины начинается явление декомпрессии. Уменьшаются внутреннее давление и окружное разрушающее напряжение в вершине трещины, что приводит к ее остановке.

В вертикальных сварных соединениях стенки резервуара условия образования и развития макротрещины идентичны только до достижения критической длины. Максимальные рабочие кольцевые напряжения в расчетных поясах стенки равны $2/3 \sigma_r$, количество циклов нагружений не более ста в год. Через 10 лет эксплуатации количество циклов нагружения стенки составит 10^3 . При расчетном сроке службы резервуара 40 лет максимальное число нагружений не превысит 4×10^3 , что не выходит за область малоциклового усталости.

Это область, в которой интенсивно развиваются усталостные трещины с местной концентрацией напряжений в вершине, удовлетворяющей неравенство: $\sigma_{м.к.} > 2\sigma_r$, где $\sigma_{м.к.}$ – уровень местных напряжений в зоне концентрации. Развитие усталостной трещины при этом происходит с упругопластической деформацией металла в зоне концентрации (ее вершине) как на стадии нагружения, так и при разгрузке стенки [9]. Такое развитие обусловлено взаимодействием зоны концентрации с основным объемом металла стенки. Развитие усталостных трещин происходит при меньшем числе циклов.

После достижения усталостной трещиной критической длины должна появиться, как указано выше, новая движущая сила трещины – потенциальная энергия хранимой жидкости, которая находится выше трещины. При высоте стенки резервуара 20,0 м и удельном весе хранимого несжимаемого продукта 1000 кг/м³ давление на стенку не будет превышать 0,2 МПа. Трудно представить, какая должна быть длина усталостной трещины при таком давлении и толщине стенки резервуара 16...20 мм, чтобы произошло раскрытие ее берегов до критических размеров с последующим процессом вязкого разрушения стенки резервуара. Видимо поэтому авторы не нашли в литературе случаев вязкого разрушения стенки резервуаров.

В этих условиях авторы считали целесообразным исследовать возможность предотвращения лавинного разрушения стенки резервуара путем выявления сквозной трещины в вертикальном сварном соединении стенки с применением критерия утечки до разрушения на начальном (докритическом) этапе ее развития. Применение данно-

го критерия в сварных сосудах высокого давления рассмотрено в работе [10]. Установлено, что после того, как трещина «проскакивает» толщину стенки, в емкости образуется утечка и есть время для того, чтобы обнаружить трещину до достижения ее критического размера.

Исследования показали, что относительно сосудов давления достичь выполнения условий утечки в условиях плоской деформации не так легко. При этом учитывается, что потеря работоспособности сосудов в первую очередь связана с нарушением их герметичности, т. е. с образованием сквозных трещин. Наличие высокого давления, температуры и токсичности продукта хранения требуют при образовании в стенке сосуда сквозной трещины даже начальной длины принятия срочных мер по ее локализации.

В этом отношении резервуары для хранения нефти имеют существенно лучшие условия относительно их безопасности. Внутреннее избыточное давление не более 0,002 МПа, давление продукта хранения на стенку не более 0,2 МПа, температура стенки не более 180 °С, продукт хранения мало токсичен. Количество циклов заполнений–опорожнений резервуара приведено выше. Опыт эксплуатации резервуаров показывает, что уже после образования в сварном стыковом соединении стенки сквозной трещины длиной 5...10 мм происходит просачивание нефти с образованием на поверхности стенки темного пятна. Разработка и освоение металлургами промышленного выпуска новых марок нормализованных качественных сталей (09Г2СЮч-У, 18Г2АВ [11, 12]) с содержанием серы $S \leq 0,015$ % и значением $KCV_{-40} \geq 80$ Дж/см² создали условия, при которых развитие сквозной трещины в сварном соединении на начальном этапе может иметь участок предсказуемого развития. Его наличие наблюдалось при испытании отдельных образцов с усталостной сквозной трещиной. Это небольшой участок, но для резервуаров с количеством нагружений сто в год даже 500 циклов дает достаточно времени для визуального выявления трещины по нефтяному пятну и надежного предотвращения разрушения емкости.

Необходимость исследований начального этапа развития трещины диктовалась и производственной необходимостью. С применением указанных сталей уже построены и успешно эксплуатируются резервуары с защитной стенкой объемом 50 и 75 тыс. м³ [4]. Причем, по проекту стали с повышенными вязкими свойствами выполняют функции и по предотвращению лавинных разрушений стенки рабочего резервуара, что требуется в стандартах [2, 3, 5]. Выполненные исследования должны были научно обосновать принятое решение.

С учетом приведенных обстоятельств была составлена программа экспериментальных исследований процесса зарождения и развития усталостной трещины в вертикальном сварном стыковом соединении стенки резервуара в условиях плоской деформации.

Цель исследований:

- определить время (выраженное количеством циклов нагружений) зарождения усталостной трещины на длине искусственного острого надреза, выполненного в сварном стыковом соединении образца и время прорастания усталостной трещины по толщине образца до выхода на противоположную поверхность;

- получить зависимость увеличения в условиях плоской деформации длины образовавшейся сквозной трещины от количества циклов нагружения на начальном этапе ее развития.

Программа предусматривала: в условиях циклического нагружения выполнить испытание трех плоских образцов с поперечным стыковым сварным соединением. В процессе испытания образец должен максимально отражать работу сварного вертикального соединения стенки резервуара. Испытания выполнять на пульсаторе ЦДМ-200ПУ. Рабочее усилие пульсатора $P_{max} = 100$ т. Принятая частота нагружения 5 Гц. В качестве инициатора усталостной трещины в образце по линии сплавления сварного шва выполнить фрезой надрез с радиусом в вершине 0,25 мм.

В соответствии с программой испытания образец состоял из двух пластин стали 09Г2СЮч-У390 (рис. 1), сваренных поперечным сварным стыковым швом. Химический состав

и механические свойства стали представлены в табл. 1 и 2. Толщина пластин 22 мм. Разделка кромок V-образная с одной вертикальной кромкой, что позволило иметь четкую линию сплавления по всей толщине образца. Сварка выполнялась электродами LB-52U с выводом шва на выводные планки. Усиления шва с двух сторон было снято фрезерованием поверхности до толщины 20 мм. Чистота обработки поверхности позволяла контролировать появление утяжки по толщине образца на концах трещины в процессе его испытания. Толщина 20 мм соответствует толщине III или IV пояса стенки резервуаров $V = 50...75$ тыс. м³. Предварительно было установлено, что ширина образца 160 мм позволяет обеспечить условия плоской деформации при развитии сквозной трещины до длины 40...45 мм. Напряжение в образце $\sigma_{max} = 2/3 \sigma_r$, что соответствует расчетным напряжениям в стенке резервуаров [1], а $\sigma_{min} = 0,1 \sigma_{max}$.

Всего было испытано три образца. Надрез на третьем выполнялся более толстой фрезой с несколько большим радиусом в вершине, что отразилось в определенной мере на результатах первого этапа испытаний. Результаты первого этапа приведены в табл. 1. Этап заканчивается выходом начальной поверхностной трещины на противоположную сторону образца и состоит из двух периодов: зарождения усталостной трещины по линии острого надреза и развития усталостной трещины по толщине образца до образования сквозной трещины.

Первый период характеризует чувствительность стали к поверхностным острым надрезам. При этом надо принимать во внимание, что

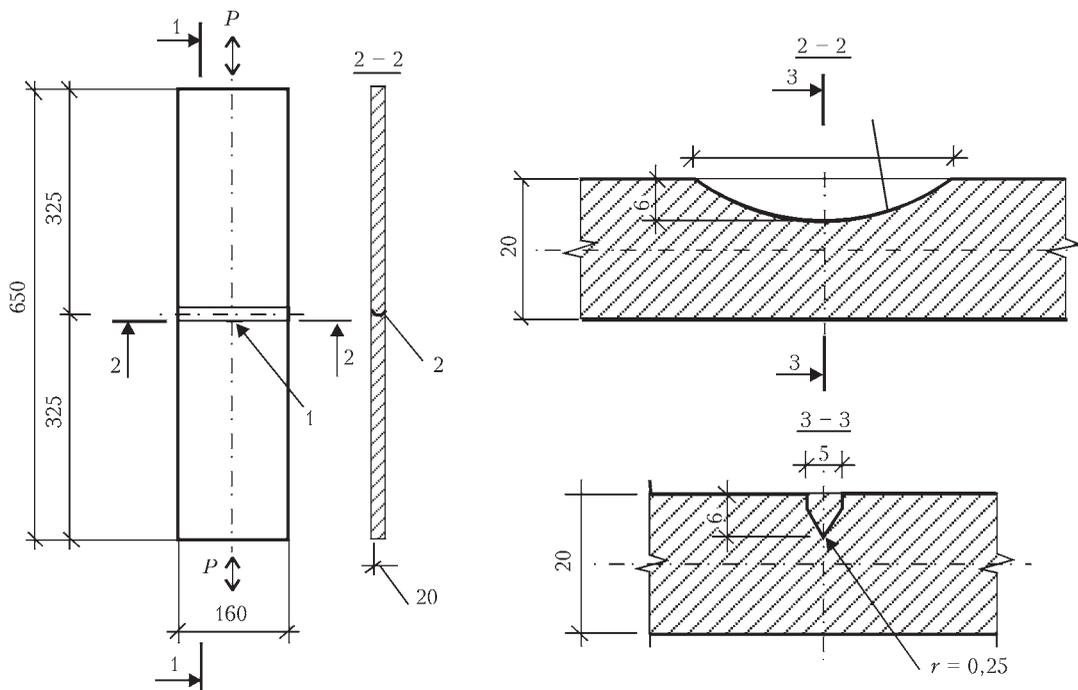


Рис. 1. Схема и размеры образцов для испытания сварного соединения стали 09Г2СЮч-У390 на циклическую трещиностойкость; надрез по линии сплавления; усиление снято с двух сторон

Таблица 1. Химический состав стали 09Г2СЮч-У 390, мас. доля, %

C, ×0,01	Mn, ×0,01	Si, ×0,01	S, ×0,001	P, ×0,001	Cr, ×0,01	Ni, ×0,01	Cu, ×0,01	Al, ×0,001	V, ×0,01	Ce, ×0,001
По ТУ 14-1-5065. Изменение 1 [11]										
10...13	190...220	50...80	12	15	< 30	< 30	< 3	40...80	–	1...5
Данные ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ										
11	210	60	11	15	11	21	5	80	–	4

Таблица 2. Механические характеристики листового проката стали 09Г2СЮч-У390

Толщина листа, мм	σ_T Н/мм ²	σ_B Н/мм ²	δ_5 , %	$\Psi_{z'}$, %	σ_T/σ_B	KCV ₋₄₀ , Дж/см ²
По ТУ 14-1-5065–2006. Изменение 1 [11]						
От 8 до 50	390	530	18	-	0,74	≥ 60
Данные ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ						
20	415	550	29	56	0,75	156

размеры надреза на образце существенно превышают возможные повреждения поверхности листов стенки резервуара, что дает определенный запас полученным результатам. Из табл. 1 видно, что для зарождения усталостной трещины по всей длине принятого надреза необходимо не менее 12 тысяч циклов нагружений. При нормативной интенсивности нагружений резервуаров 100 в год и расчетном сроке службы резервуара 50 лет имеем 5×10^3 циклов нагружения, что более чем в два раза превышает полученное значение.

Полученные данные показывают, что при применении стали 09Г2СЮч-У процесс зарождения усталостной трещины в сварных соединениях может растянуться на весь срок эксплуатации емкости. Надо учитывать, что в реальности на стенке могут быть участки швов с пониженными пластическими свойствами. На них зарождение трещины произойдет при значительно меньшем количестве циклов нагружения. Процесс развития данных трещин рассмотрен ниже.

Во втором периоде исследован процесс подрастания зародившейся усталостной трещины по толщине образца. Из табл. 3 видно, что выполнение на третьем образце надреза более толстой фрезой существенно повлияло на началь-

ную длину трещины и развитие ее по толщине образца. Здесь оценка интенсивности выполнена по двум образцам № 1 и 2. Количество циклов их нагружений до образования сквозной трещины составило порядка 10×10^3 , что, как и в первом периоде, вдвое превышает число нагружений (5×10^3) резервуара за весь расчетный срок службы. Это имеет важное практическое значение. Согласно НД [2, 3] с периодичностью десять лет проводится полное обследование резервуаров с выполнением радиографического или УЗ контроля сварных соединений стенки. Срок десять лет – это $10 \times 100 = 10^3$ циклов нагружений, т.е. есть достаточные условия для выявления с определенным запасом усталостной трещины в сварных соединениях стенки.

На втором этапе исследований определялась скорость критического развития сквозной трещины. На данном этапе коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины приближается к своему критическому значению K_c , что существенно увеличивает скорость развития трещины.

После выхода на противоположную поверхность произошла остановка трещины на 3...5 с последующим ее страгиванием и развитием. Это начало отсчета нагружений. Результаты испытания представлены на табл. 4. На образце развитие трещины ограничено наличием условий плоской деформации

Таблица 3. Результаты фиксации развития трещины на образцах с начальным поверхностным надрезом по зоне сплавления на поперечном стыковом шве в процессе циклического нагружения

Номер образца	Марка листовой стали	Условия выполнения сварного соединения	Количество циклов от момента выхода пультатора на рабочий режим испытания до момента зарождения усталостной трещины по всей длине надреза, N, цикл	Длина начальной усталостной трещины на поверхности образца, мм	Количество циклов от зарождения трещины по всей длине надреза до образования сквозной трещины, N, цикл	Длина поверхностной трещины со стороны надреза при образовании сквозной, мм	Начальная длина сквозной трещины при выходе ее на противоположную сторону, мм
1	09Г2СЮч-У390 нормализованная	Сварка в свободном состоянии	12100	41	11400	61	8
2			13300	38	9400	56	10
3			14600	47	5800	58	12

Т а б л и ц а 4. Длина $2a$ сквозной трещины со стороны противоположной надрезу при количестве циклов нагружения образца N

Номер образца	Марка стали, условия сварки	Начальная длина трещины $2a$, мм при $N_{нач.} = 0$	Количество циклов нагружения N						
			100	150	200	250	300	400	600
			Длина сквозной трещины $2a$, мм с учетом начальной длины						
1	09Г2СЮч-У390 нормализованная, сварка в свободном состоянии	8	10	11	12	11	14	20	25
2		10	12	-	14	-	16	20	30
3		12	14	-	18	-	24	27	32

Примечание. Длина критической сквозной трещины $2a_{кр} \sim 210$ мм

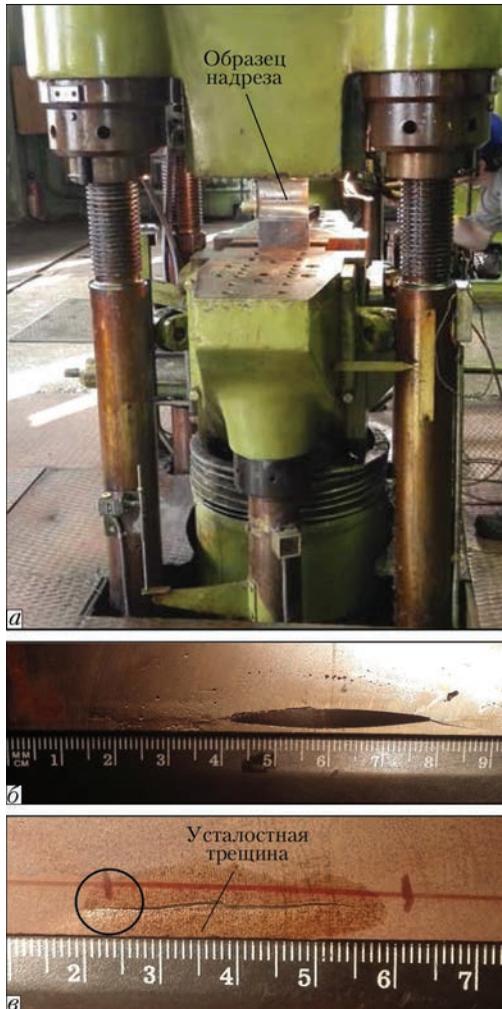


Рис. 2. Испытание образцов при циклическом нагружении: а – общий вид пульсатора ЦДМ-200ПУ; б – образование усталостной трещины от острого надреза; в – развитие сквозной трещины на обратной к надрезу стороне образца (кружком отмечено начало утяжки)

ции. Для испытываемых образцов это 30...32 мм, что соответствует 500...600 нагружений. При данном количестве циклов на концах трещины начала появляться утяжка образцов по толщине, что свидетельствовало о переходе образца в плоское напряженное состояние. На этом испытания прекращались. Отметим, что практически те же результаты были получены для стали 06ГБ [13].

С учетом отсутствия возможности четкого визуального фиксирования на поверхности образца условий плоской деформации в качестве оценоч-

ного результата принят период до 300 циклов нагружений, что соответствует предсказуемой длине трещины 17 мм. Ясно, что на реальной стенке резервуара предсказуемый участок развития трещины будет иметь большую длину, что пройдет в запас трещиностойкости стенки.

При коэффициенте запаса по количеству циклов $K_N = 10$ [9] имеем 30 циклов нагружений. При количестве циклов в год 100, что приведено выше, и 350 заполнений–опорожнений в год согласно [14], имеем 90 и 30 с безопасного развития трещины в стенке реального резервуара и ее визуального выявления. Регламентом технического обслуживания резервуаров предусматривается ежедневный визуальный осмотр всей поверхности стенки с занесением результатов осмотра в специальный журнал. Такой осмотр гарантирует выявление появившейся сквозной трещины в сварном соединении стенки резервуара по нефтяному пятну на начальном этапе ее критического развития.

Наличие условий для гарантированного выявления сквозной трещины на начальном этапе ее развития исключает возможность лавинного разрушения стенки резервуара, что удовлетворяет требованию нормативных документов [2, 3]. При этом из условий безопасности важно, что при давлении на стенку 0,2 МПа из начальной трещины истечение нефти на стенке происходит в виде просачивания с образованием темного пятна.

Длительность предсказуемого развития трещины 90 и 30 сут получена на сварных соединениях образцов, сваренных и прошедших контроль в лабораторных условиях. В сварных соединениях, выполняемых в условиях площадки строительства, в сварном шве возможно наличие пропущенных дефектов, которые могут существенно ускорить процесс развития трещин. В сварных соединениях стенки резервуаров РВСПК 50 тыс. м³, сталь 16Г2АФ толщиной 14 мм, авторы выявляли в летнее время по нефтяным пятнам трещины длиной 3...5 мм. С учетом приведенного считаем приемлемым для нейтрализации выявленной трещины в сварном соединении стенки со стали 09Г2СЮч-У принимать в регламенте технического обслуживания срок не более 5 сут.

Выводы

На основании результатов испытания специальных образцов из стали 09Г2СЮч-У390 с иницированием усталостной трещины в сварном стыковом соединении установлено следующее.

Образование в сварном стыковом соединении стали 09Г2СЮч-У от острого поверхностного надреза принятой длины усталостной трещины на всю толщину образца (20 мм) занимает более 10 лет эксплуатации резервуаров. Такой срок превышает принятую нормативную периодичность полного диагностирования сварных соединений стенки (не более 10 лет) и позволяет выявлять имеющиеся в сварном соединении трещины на стадии их развития по толщине стенки.

На начальном этапе подрастания в сварном стыковом соединении стали 09Г2СЮч-У390 сквозной усталостной трещины есть участок предсказуемого ее развития. Длительность предсказуемого участка критического развития трещины в условиях плоского напряженного состояния составляет около 300 циклов нагружений при нормативном количестве нагружений резервуаров не более 100 в год. Продолжительность во времени критического развития трещины на данном участке позволяет по визуально выявляемому на поверхности стенки пятну нефти надежно выявлять и предотвращать лавинные разрушения стенки резервуаров.

Результаты выполненных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины исследований развития сквозных трещин в сварном стыковом соединении листовой нормализованной стали 09Г2СЮч-У390 на участке их нестабильного развития подтверждают целесообразность применения листового проката данной стали для расчетных поясов стенки цилиндрических резервуаров для хране-

ния нефти объемом 50, 75, 100 тыс. м³ и внесение ее в соответствующий стандарт Украины.

1. Сварные стальные резервуары для хранения нефтепродуктов: API STANDART 650, 12 ред., 2013. – С. 514.
2. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів: ДСТУ Б В.2.6–183:2011. – К.: Мікрореґіон України, 2012. – С. 77.
3. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов: ГОСТ Р 52910–2008. – М.: Стандартинформ, 2008. – С. 52.
4. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов: ТКП 45-5.04-172–2010 (02250). – Минск, 2011. – С. 153.
5. Современное резервуаростроение в Республике Беларусь / О. П. Черников, А. Ю. Барвинко, А. И. Васюткич [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2014. – № 12. – С. 9–13.
6. Применение листовой качественной стали повышенной прочности в резервуарах для хранения нефти / А. Ю. Барвинко, А. В. Юрчишин, Ю. П. Барвинко [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2016. – № 1. – С. 2–8.
7. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов: СТО-СА-03-002–2009. – М., 2009.
8. Иванцов О. М. Надежность магистральных трубопроводов / О. М. Иванцов, В. И. Харитонов. – М.: Недра, 1978. – С. 165.
9. Карзов Г. П. Сварные сосуды высокого давления / Г. П. Карзов, В. П. Леонов, Б. Т. Тимофеев. – Л.: Машиностроение, 1982. – С. 287.
10. Брок Д. Основы механики разрушения / Д. Брок. – М.: Высш. шк., 1980. – С. 368.
11. Изменение 1. Прокат толстолистовой из низколегированной стали марок 09Г2СЮч; 09Г2СЮч-У; 09ХГ2СЮч; 09ХГ2СЮч-У: ТУ 14-1-5065–2006. – Введ. 01.03.2012
12. Stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości Gatunki: PN-86 H-84018 POLSKA NORMA.
13. Обоснование критерия «течь перед разрушением» применительно к вертикальным цилиндрическим резервуарам для хранения нефти / В. В. Кныш, А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 9. – С. 29–33.
14. ОАО «АК «Транснефть». Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000...50000 м³: РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. – М., 2004. – С. 71.

Dependence of a rate of fatigue crack propagation along the thickness of vertical welded joint of reservoir wall and through-the-thickness crack at initial step of its development on number of loading cycles was developed experimentally under conditions of cyclic loading of special specimens with butt joint. Specimens' loading corresponded to the work of welded joints in wall of oil storage reservoir. The specimens are manufactured from sheet steel 09G2SYuch-U390, $t = 22$ mm, $KCV_{40} \geq 80$ J/cm². It is shown that using the steel with high indices of impact toughens for wall allows visual detection (by oil plume) of through-the-thickness crack formed in the wall that eliminates the possibility of its avalanche-type fracture.

Keywords: oil storage reservoirs, steels with increased ductility, propagation of ductile crack, prevention of avalanche-like fractures.

Поступила в редакцию
28.04.2016

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ АКТИВАЦІЇ ПРИ ТЕРМОГРАФІЧНОМУ КОНТРОЛІ ДЕФЕКТІВ ТА СТРУКТУРНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ В ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛАХ*

М. І. БАЗАЛЄСВ, В. В. БРЮХОВЕЦЬКИЙ, В. Ф. КЛЕПІКОВ, В. В. ЛИТВИНЕНКО

Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України. 61002, м. Харків,
вул. Чернишевська, 28. E-mail: ntcefo@yahoo.com

Розглянуто фізико-технічні основи термографічного контролю як неруйнівного методу структури феромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем та механізми формування температурних аномалій на неоднорідностях у металі шляхом перетворення частини електромагнітної енергії в тепло. Термопроявлення дефектних структур реєструються тепловізійними засобами контролю. Наведено принципову схему і технічні характеристики експериментальної електрофізичної установки для контролю структурних неоднорідностей у феромагнітних матеріалах за методом активної тепловізійної термографії. Беручи до уваги матеріали експериментальних досліджень, розроблено принципи ідентифікації температурних аномалій, створено науково-технічні основи електрофізичного тепловізійного методу. Библиогр.13, рис. 9.

Ключові слова: термографічний контроль, неруйнівний контроль, електромагнітна активація, термопроявлення дефектних структур, активна тепловізійна термографія

Активні термографічні методи неруйнівного контролю конструкційних матеріалів все більш поширюються в різних галузях промисловості у зв'язку з можливістю вибіркового розігріву дефектних ділянок або зон порушення суцільності матеріалу і реєстрації їх термопроявлення тепловізійними засобами контролю [1]. Ефективність методів у значній мірі залежить від вибору типу активуючої дії, енергетичний вплив від якої найбільш чутливий до зміни теплофізичних та електрофізичних характеристик в зонах порушення суцільності матеріалу. Природа утворення дефектів пов'язана перш за все з характеристиками матеріалу і умовами його експлуатації. При активному неруйнівному методі теплового контролю дефекти, що ідентифікуються, проявляються через температурний відгук на енергетичний вплив, якому піддається об'єкт дослідження. Завдяки розходженню теплофізичних властивостей основного матеріалу і сторонніх включень/дефектів при активації створюються теплові і температурні поля, які відображають структуру і стан об'єкта дослідження.

Тепловиділення в дефектній зоні можна ініціювати шляхом впливу на контрольований матеріал фізичним полем, наприклад, акустичним або електромагнітним (для феромагнітних матеріалів). При цьому інформативні параметри температурного поля (амплітуда, градієнт тем-

ператури, просторові характеристики розподілу термоаномалій) відображають особливості внутрішньої будови речовини, зокрема, наявність структурних неоднорідностей і дефектів з підвищеним розсіюванням енергії пружних хвиль або електромагнітної енергії у тепло. Це дозволяє виявляти несцільності (тріщини, пористість, сторонні включення) матеріалів, зміну їхньої структури і фізико-хімічних властивостей за зміною теплопровідності, теплоємності, коефіцієнта тепловіддачі неоднорідностей середовища.

Ефективність сучасних неруйнівних методів оперативного контролю деградаційних процесів в феромагнітних металах і сплавах може бути суттєво підвищена завдяки розвитку методів активного термографічного контролю із застосуванням енергії електромагнітних полів. Це може дати нові результати, які неможливо одержати, використовуючи лише теплову або акустичну активацію середовищ. Тому важливим є подальше вивчення різних аспектів взаємодії електромагнітних полів з дефектами кристалічної ґратки, проведення комплексного аналізу впливу дислокацій, точкових дефектів і різних побічних ефектів на процеси їх термопроявлення.

Основними напрямками удосконалення термографічних методів НК конструкційних матеріалів (металів) є підвищення температурної чутливості та часового розрізнення, оптимізація обчислю-

* По матеріалам роботи, виконаної в рамках цільової комплексної програми «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–1015 рр.)

вальних процедур з одержаними термограмами та апробація різноманітних фізичних механізмів активації температурного поля в околі дефектної зони. Серед підходів до активації надлишкового тепловиділення в дефектній зоні феромагнетика з метою її подальшої реєстрації можна виділити метод, що ґрунтується на впливі на досліджуваний об'єкт електромагнітним полем. Метод заснований на зміні вихрових струмів і магнітних потоків, що збуджуються на неоднорідностях у метали, під впливом яких за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в теплоту формуються температурні аномалії, і принципах візуалізації температурних полів, що відображують внутрішню структуру (наявність дефектів) об'єктів контролю, стимульованих дією електромагнітних полів.

Втрати електромагнітної енергії на тепло обумовлені процесами перемагнічування (гістерезисні втрати) і втратами на вихрові струми (динамічні втрати). Механізм виникнення таких втрат пов'язаний зі зміною магнітної індукції за рахунок руху доменних стінок під дією магнітного поля і залежить від структурної неоднорідності матеріалу. Відповідно вихрові струми, що викликані перемагнічуванням магнітних матеріалів, впливають на питомі електричні втрати. Виникнення в сплаві будь-яких типів дислокацій веде до зростання питомого електричного опору, а їхнє зменшення знижує його. На величину і напрямок вихрових струмів у метали впливають його питомий електричний опір, частота електричного струму і магнітна проникність. Через дисипацію електромагнітної енергії на структурних неоднорідностях (міжфазних і міжзеренних границях, зонах концентрації напружень, мікротріщинах і порах) формується термозображення – картина просторового розподілу теплової енергії згідно з особливостями термопроявлення дефектної структури, стрибками теплофізичних параметрів, показників щільності і пружності матеріалів.

Принципи застосування електромагнітних полів в активній термографії. В існуючих методах електромагнітного активного термографічного контролю [2, 3] використовуються ефекти зміни теплофізичних та електрофізичних характеристик внаслідок порушення суцільності матеріалу. Частота електромагнітного поля виступає параметром, що задає глибину зондування. Зазначимо, що дані методики є перспективними для проведення тестових лабораторних досліджень, при цьому необхідно враховувати особливості процесів трансформації електромагнітної енергії активуючого впливу в теплову на структурних неоднорідностях в залежності від типу і електромагнітних властивостей металів, а також зміни їх структури під дією експлуатаційних чинників.

Фундаментальні теоретичні дослідження [4, 5] дозволяють визначити необоротні втрати електромагнітної енергії, що виділяється в матеріалі у вигляді тепла (втрати на гістерезис, динамічні втрати), вплив неоднорідності структури магнітного матеріалу на процеси зсуву (дроблення) стінок доменів і т.п. Величина магнітної енергії, що витрачена, залежить від частоти поля і властивостей матеріалу, його геометричних розмірів, а також втрат, пов'язаних з процесами релаксації магнітного моменту (спін-спінової і спін-ґраткової релаксації). Динамічні втрати пов'язані з вихровими струмами, індукованими в об'ємі матеріалу, і електричним опором матеріалу. Застосування цих ефектів і процесів в активній електрофізичній термографії є невід'ємною складовою розвитку неруйнівних методів теплової дефектоскопії металів.

Ефективність застосування методу для контролю структурних змін в феромагнітних матеріалах, які перебували під дією механічних навантажень, в значній мірі залежить від встановлення залежності тепловтрат від погіршення структури матеріалу за рахунок підвищеної щільності дислокацій, оцінки структурних змін в зонах з підвищеною щільністю дислокацій, що відбуваються в конструкційних матеріалах у результаті, наприклад, термічних і деформаційних навантажень. У реальних доменах джерелами магнітної анізотропії є внутрішні напруження, форма кристалітів і інші причини, які можуть бути виявлені при активації зразків змінним магнітним полем. Невід'ємною частиною цих досліджень є вивчення принципів ідентифікації температурних аномалій, активованих в зонах дефектоутворення на основі аналізу даних деградації теплофізичних властивостей матеріалів з урахуванням дії зовнішніх чинників, які створюють хибні температурні аномалії при термографічному контролі.

Приймаючи до уваги дані аналізу об'єктивно існуючих зв'язків характеристик матеріалу з параметрами зовнішнього впливу і залежність реакції на цей вплив від амплітудних і частотних характеристик зовнішнього впливу, метод термографічного контролю структурного стану матеріалів на основі електромагнітної активації є одним із найбільш перспективних методів структурної дефектоскопії феромагнітних тіл. Формування інформаційного поля ІЧ-випромінювання тіла, що активується, відбувається за рахунок як прямого перетворення електромагнітної енергії в теплову енергію на дефектних структурах, так і впливу дефектних структур на перерозподіл теплових потоків, що створені поверхневими вихровими токами індукції.

У магнітоупорядкованих твердих тілах при їхньому перемагнічуванні змінним магнітним по-

лем H частина електромагнітної енергії перетворюється в теплоту. Необоротне виділення тепла у феромагнітних і феримагнітних матеріалах у змінних магнітних полях широко відомий [6]. Перемагнічування феромагнетика в змінних магнітних полях завжди супроводжується тепловими втратами енергії, які обумовлені втратами на гістерезис і динамічні втрати. Динамічні втрати пов'язані з вихровими струмами, індукованими в об'ємі матеріалу, і залежать від електричного опору матеріалу, зменшуючись із ростом опору.

Втрати на гістерезис W (Дж/м³) (в одному циклі перемагнічування) визначаються площею петлі гістерезису

$$W = \int_0^{H_m} B(H) dH \quad (1)$$

і можуть бути обчислені для одиниці об'єму речовини за емпіричною формулою

$$\frac{W}{V} = \eta B_H^n, \quad (2)$$

де η – коефіцієнт залежний від матеріалу; B_H – максимальна індукція, що досягається протягом циклу; n – показник ступеня, рівний залежно від матеріалу 1,6...2,0.

Питомі втрати енергії на гістерезис P_Γ – втрати, витрачені на перемагнічування одиниці маси в одиниці об'єму матеріалу за секунду:

$$P_\Gamma = \frac{W}{mVT}, \quad (3)$$

де f – частота змінного струму; T – період коливань.

Питомі втрати на вихрові струми P_B можна визначити за такою формулою:

$$P_B = \frac{4B_m H_c f}{\gamma}, \quad (4)$$

де B_m – магнітна індукція; Тл; f – частота змінного струму, Гц; γ – щільність матеріалу пластини, кг/м³; H_c – коерцитивна сила.

Загальні питомі втрати на перемагнічування магнітом'яких матеріалів:

$$P = P_B + P_\Gamma = \frac{4B_m f}{\gamma} \left(\frac{B_m f d^2 k^2}{3\rho} + H_c \right), \quad (5)$$

де H_c – значення коерцитивної сили (наведено без урахування щільності дислокацій і концентрації доменів); d – товщина пластини, мм; k – коефіцієнт форми кривої магнітної індукції.

На коерцитивну силу на основі сучасної дислокаційної теорії магнітних властивостей матеріалів впливає взаємодія доменної і дислокаційної структур.

Для цього випадку коерцитивна сила може бути представлена у вигляді [7]:

$$H_c = 1,5 \frac{K\delta}{\mu_0 I_s D} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{c_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\frac{c_2}{2}}. \quad (6)$$

Тут K – константа магнітної анізотропії; δ – товщина доменної стінки; μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I_s – спонтанна намагніченість; D – діаметр кристаліта; N – поточна щільність дислокацій; N_0 – максимальна щільність дислокацій; c_1 – стала для відношення щільності дислокацій; n – поточна концентрація доменів; n_0 – максимальна концентрація доменів; c_2 – стала для відношення концентрації доменів.

Загальні питомі втрати з урахуванням формули (5) можна представити такою формулою:

$$P = \frac{4B_m f}{\gamma} \left[\frac{B_m f d^2 k^2}{3\rho} + 1,5 \frac{K\delta}{\mu_0 I_s D} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{c_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\frac{c_2}{2}} \right]. \quad (7)$$

Ця розрахункова формула питомих втрат для магнітних матеріалів залежно від щільності дислокацій і концентрації доменів підтверджується даними експериментальних досліджень.

Особливості термопроявлення структурних неоднорідностей в матеріалах при дії електромагнітних полів. Для вирішення найважливішої проблеми, пов'язаної з визначенням найбільш схильних до руйнування зон із граничним станом металу, можна використати зв'язок електрофізичних властивостей металів на рівні кристалічних ґраток з механічними властивостями, неоднорідностями структури, пружними і пластичними деформаціями і т. ін. [8]. В цьому випадку необхідно враховувати особливості процесів трансформації електромагнітної енергії активуючого впливу на структурних перетвореннях матеріалу під дією експлуатаційних чинників: розвинених дефектів, зон концентрації напружень на елементах конструкцій, у яких на рівні структури металу відбулися незворотні зміни. Кожна стадія процесу деформування і руйнування металу під дією стискаючих і розтягуючих зусиль, температури і т.д. може бути охарактеризована сукупністю електрофізичних параметрів, значення яких можуть бути виміряні та використані для виявлення і прогнозування в металевих конструкціях ділянок металу з неприпустимою величиною накопичених пошкоджень. Оскільки процеси деформації кристалічної структури, зародження і розвитку дефектів супроводжуються зміною електрофізичних властивостей металу [9, 10], доцільним стає активація металу електромагнітним полем, дисипація якого на структурних неоднорідностях приводить до відповідної

диференціації температурного поля, що відображає структуру зразка. У зв'язку з цим очевидним стає доцільність залучення методів термографічного контролю для аналізу структурного стану металів, враховуючи інтенсивний розвиток тепловізійної техніки, яка дозволяє проводити дослідження з високим температурним, просторовим та часовим розрізненням [1].

Утворення дефектів пов'язане як з характеристиками матеріалу, так і з умовами його експлуатації. Довга експлуатація виробів при високій температурі або короткочасний великий перегрів понад розрахункову температуру викликають зміни у мікроструктурі металу, які можуть носити як критичний характер, так і бути припустимими для даного сплаву чи металу. Важливим є не тільки виявлення уже наявних дефектів, а і прогнозування можливості їх утворення за тих чи інших умов експлуатації. Вміння ідентифікувати такі ділянки об'єктів і конструкцій за допомогою технологій тепловізійної інфрачервоної (ІЧ) радіометрії є актуальною задачею. Ідентифікація поверхневих температурних аномалій, які виникають в місцях існування внутрішніх дефектів, здійснюється на основі аналізу змін температурного поля на поверхні випромінювання тіл після електромагнітної активації.

Ефективність застосування методу для контролю структурних змін в феромагнітних матеріалах, які перебували під дією механічних навантажень, в значній мірі залежить від встановлення залежності тепловтрат від підвищення щільності дислокацій, оцінки структурних змін в зонах з підвищеною щільністю дислокацій, що відбуваються в конструкційних матеріалах у результаті, наприклад, термічних і деформаційних навантажень. Доменна структура феромагнетиків надзвичайно чутлива до будь-яких порушень правильності кристалічної будови [5]. Доменна границя може служити чутливим індикатором, здатним реагувати на невеликі зміни в структурі речовини, викликані релаксаційними процесами [11]. Точкові, лінійні і поверхневі дефекти ґраток, області неоднорідності напруженого стану, мікроструктурні елементи – границі зерен, включення різних фаз, неметалічні включення і пори, тріщини – все це впливає на доменну структуру [7, 8]. У реальних доменах джерелами магнітної анізотропії є внутрішні напруження, форма кристалітів і інші причини, які можуть бути виявлені при активації зразків змінним магнітним полем. Невід'ємною частиною цих досліджень є вивчення принципів ідентифікації температурних аномалій, активованих в зонах дефектоутворення на основі аналізу даних деградації теплофізичних властивостей матеріалів з урахуванням дії зовнішніх чинників, які створюють

хібні температурні аномалії при термографічному (тепловізійному) контролі [1].

Перемагнічування феромагнетику в змінних магнітних полях завжди супроводжується тепловими втратами енергії, які обумовлені втратами на гістерезис і динамічними втратами. Проведений аналіз [5, 9, 10, 12] показує, що існує зв'язок між параметрами магнітного гістерезису з параметрами структурних неоднорідностей феромагнітних сталей: розміром зерна, кількістю і розміром слабомагнітних і немагнітних включень, величиною і розподілом внутрішніх напружень та ін. У зв'язку із цим виникає питання про можливість рішення таких задач, як оцінка напружень у конструкційних сталях, виявлення ділянок пластичної деформації та ін.

Динамічні втрати, пов'язані з вихровими струмами, індукованими в об'ємі матеріалу, залежать від електричного опору матеріалу, зменшуючись з його ростом. Про зміну концентрації дефектів у матеріалі можна побічно судити за зміною питомого електричного опору. Виникнення в сплаві будь-яких типів дислокацій веде до зростання питомого електричного опору, а їхнє зменшення його знижує [7]. Питомий електричний опір феромагнетиків має високу чутливість до виникнення в структурі дефектів.

При пластичній деформації зі збільшенням величини деформації і ростом щільності дислокацій їхній розподіл стає істотно неоднорідним: дислокації утворюють компактні скупчення в площинах ковзання в зоні пластичної деформації. При активації тіла зовнішнім електромагнітним полем зона пластичної деформації може бути виявлена за даними параметрів її термопроявлення, які формуються під впливом зміни питомого електричного опору у зоні концентрації дислокацій, що співпадає з зоною пластичної деформації. Через дисипацію електромагнітної енергії на структурних неоднорідностях (міжфазних і міжзеренних границях, зонах концентрації напружень, мікротріщинах і порах) формуються термоаномалії, які здатні сформувати картину просторового розподілу теплової енергії згідно з особливостями термопроявлення дефектної структури, стрибками теплофізичних параметрів, показників щільності і пружності матеріалів.

Розвиток даного напрямку досліджень пов'язаний як з теоретичним обґрунтуванням взаємозв'язку структурного стану феромагнетиків з їхніми магнітними властивостями і тепловтратами при перемагнічуванні і застосуванням нових, більш ефективних теплофізичних ефектів, так і з можливістю контролю сучасними тепловізійними ІЧ-радіометричними засобами термопроявлення внутрішніх структур і дефектів у тілах при їхній активації електромагнітним полем.

Електрофізична установка для контролю структурних неоднорідностей у феромагнітних матеріалах за методом активної теплової зйомної термографії. Принцип дії електрофізичної установки базується на зміні вихрових струмів і магнітних потоків, що збуджуються електромагнітним полем на неоднорідностях у металі, під впливом яких за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в теплоту формуються поверхневі температурні аномалії [13]. Візуалізація температурних полів засобами термографічного контролю дозволяє виявити дефектні ділянки або зони порушення суцільності і структурних перетворень в матеріалах об'єктів контролю.

На рис. 1 представлено функціональну схему термографічного стенду для дефектоскопії феромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем. Основним конструкційним елементом установки є електромагнітний активатор (ЕМА) (рис. 2), у якому за допомогою полюсів магнітопроводу (ділянка магнітопроводу, що виступає за межі котушок індуктивності) створена робоча зона, у межах якої розміщується експериментальний зразок, на який діє електромагнітне поле, що «замикається» на полюси. При цьому тепловий стан (поле ІЧ-випромінювання) зразків у робочій зоні контролюється за допомогою ІЧ-камери (тепловізора). Електроживлення (струм i) індукційних котушок L_1 і L_2 ЕМА здійснюється через понижувальний трансформатор Тр.1, вихідна напруга u якого регулюється за допомогою автотрансформатора ЛАТР. Вихідні дані трансформатора Тр.1: напруга $u = (3...6)$ В, струм $i = (100...500)$ А, максимальна потужність 3,0 кВт. П-подібний сердечник (магнітопровід) ЕМА виготовлено з феромагнітного ма-

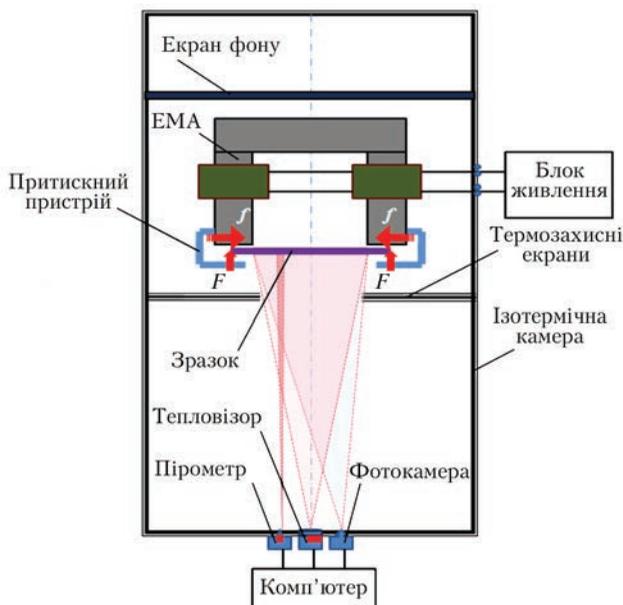


Рис. 1. Термографічний стенд для дефектоскопії феромагнітних матеріалів при активації електромагнітним полем

теріалу (шихтовані пластини з електротехнічної сталі з високою магнітною проникністю): поперечний переріз 70×80 мм2; відстань між полюсами магнітопроводу 180 мм; довжина полюсів 180 мм; маса магнітопроводу 45 кг. Магніторухійна сила котушок ЕМА (при полюсах магнітопроводу, що закорочені феромагнітним сердечником) – 1000...4000 амперів-витків (регулюється способом підключення котушок L_1 і L_2 (перемикач П) і величиною напруги u). Співвідношення активних і реактивної складових магнітних потоків у магнітопроводі регулюється активним опором RH у електричному колі навантажувальної котушки L_3 .

Обробка термозображень, отриманих за даними реєстрації поля ІЧ-випромінювання об'єкта дослідження, здійснюється на персональному комп'ютері ПК. При пропусканні змінного струму і через індукційні котушки L_1 , L_2 виникає змінний магнітний потік Φ , більша частина (Φ_0) з якого замикається в матеріалі сердечника, а менша частина (Φ_s – потік розсіювання) – по повітрю. Величина потоку, що проходить через зразок (Φ_2), значною мірою залежить від параметрів зразка (магнітної проникності, форми, розмірів, маси), а також величини магнітного опору в місцях «контакту» з полюсами сердечника, що утворюють робочу зону активації зразка електромагнітним полем.

Змінний магнітний потік, що пронизує феромагнітний зразок, індукує у матеріалі ЕРС, під дією якої виникають електричні (вихрові) струми I , що протікають по замкнених контурах, розташованих у площинах, які перпендикулярні напрямку магнітного потоку (що необхідно враховувати при виборі напрямку орієнтації зразка в робочій зоні щодо полюсів ЕМА). Вихрові струми, що протікають у матеріалі зразка, викликають його нагрівання, величина якого визначається як $I_F^2 r$ (закон Джоуля–Ленца), де I_F – діюче значення вихрових струмів, r – опір контуру, по якому вони замикаються. Для зразка, виготовленого у вигляді пластини з розмірами довжиною l , шириною h і товщиною d , розташованого щодо магнітного потоку в напрямку

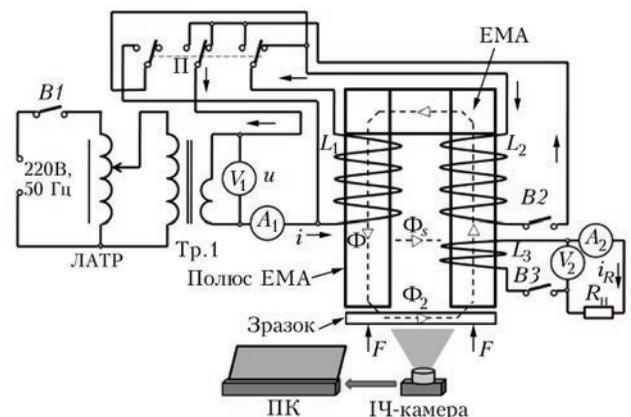


Рис. 2. Принципова схема блоку електромагнітної активації феромагнітних матеріалів

l , активна потужність P_F , що перетворюється у тепло вихровими струмами, визначається як [12]:

$$P_F = \frac{4}{3} \gamma k_f^2 d^2 \xi f^2 B_m^2 V = \xi f^2 B_m^2 V, \quad (8)$$

де $\xi = \frac{4}{3} \gamma k_f^2 d^2$ – коефіцієнт, величина якого залежить від коефіцієнта форми зразка k_f , питомої провідності матеріалу зразка, товщини перерізу зразка d ; f – частота змінного току; B_m – амплітуда індукції (щільність магнітного потоку); $V = hld$ (об'єм зразка).

Формула справедлива за умови, що $h \gg d$, при цьому втрати на вихрові струми залежать від товщини листа d , частоти змінного току (як f_2) і амплітуди індукції B_m .

Втрати P_H на перемагнічування зразка (гістерезисні втрати) можна визначити за формулою:

$$P_H = WH'f = h f B_m n, \quad (9)$$

де $W_H' = h B_m^n$ – втрати на один повний цикл перемагнічування в одиниці об'єму речовини (формула Штейнмеца); h – постійний коефіцієнт, що характеризує речовину зразка; n – показник ступеня, що залежить від амплітуди індукції.

Загальні втрати P_{FH} у зразку складаються із втрат на вихрові струми і перемагнічування:

$$P_{FH} = P_F + P_H = (\eta f + \xi f^2) B_m^2 V. \quad (10)$$

На низьких частотах переважають втрати на гістерезис. При високих частотах втрати на вихрові струми стають переважними.

Способи розташування досліджуваних зразків у робочій зоні ЕМА представлені на рис. 3. При закріпленні зразка до торців полюсів активатора із притискним зусиллям F (рис. 3, а, б) зразок знаходиться під впливом як електромагнітного поля, так і циклічних механічних напружень, які створюють полюси ЕМА за рахунок магнітострикційного ефекту (що визиває зміну лінійних розмірів магнітопроводу) і вібрації шихтованого заліза в змінному магнітному полі. Цей спосіб розташування і закріплення зразка цікавий тим, що дозволяє досліджувати синергетичний ефект термопроявлення структурних неоднорідностей при одночасній активації зразка різними за фізичною природою енергетичними полями.

На рис. 3, в, г показано варіанти розміщення і переміщення в робочій зоні ЕМА зразків з листового матеріалу (смуга) і труби відповідно.

На рис. 4 показано схему зміни розмірів робочої зони ЕМА за допомогою додаткових елементів магнітопроводу, що переміщуються. При проведенні експериментальних досліджень використовувалися ЕМА інших (оригінальних) конструкцій (рис. 5), які дозволяють розділити тепловтрати електромагнітної енергії в феромагнітних матеріалах на гістерезисні і динамічні (вихоротокові) втрати.

В активаторі (рис. 5) електромагнітне поле створюється плоскою індукційною котушкою з феромагнітним сердечником (розміри сердечни-

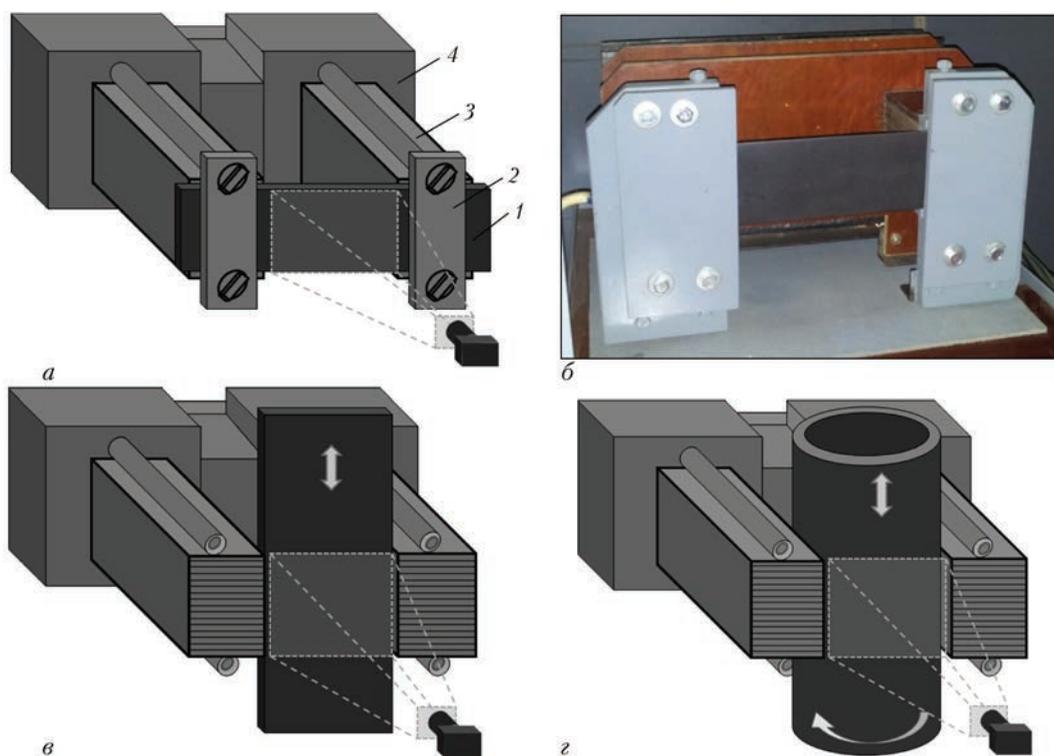


Рис. 3. Способи розташування досліджуваних зразків у робочій зоні ЕМА: а, б (фотозображення ЕМА) – зразок контактує з полюсами ЕМА з притискним зусиллям F (1 – зразок; 2 – притискний пристрій; 3 – полюс ЕМА; 4 – індукційна котушка); в – варіант розміщення і переміщення у робочій зоні ЕМА зразка з листового матеріалу; г – варіант розміщення і переміщення у робочій зоні ЕМА зразка

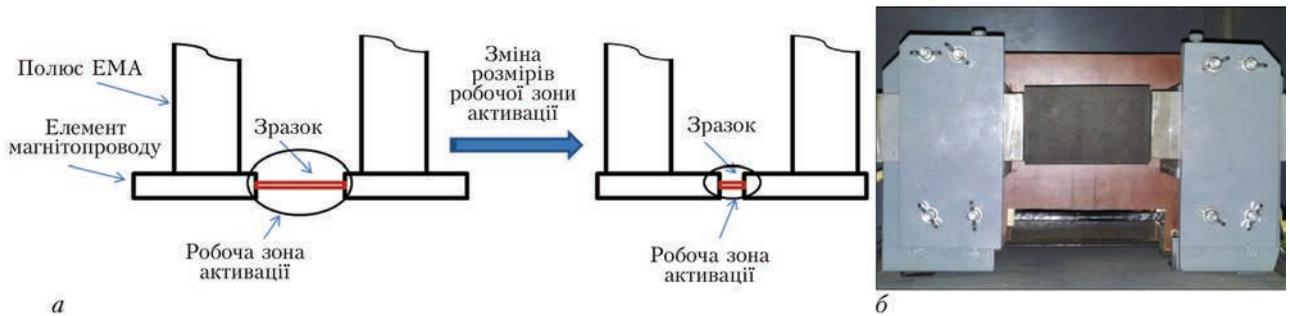


Рис. 4. Зміна розмірів робочої зони ЕМА: а – схема зміни розмірів робочої зони; б – фотозображення зразка в робочій зоні ЕМА з додатковими елементами магнітопроводу

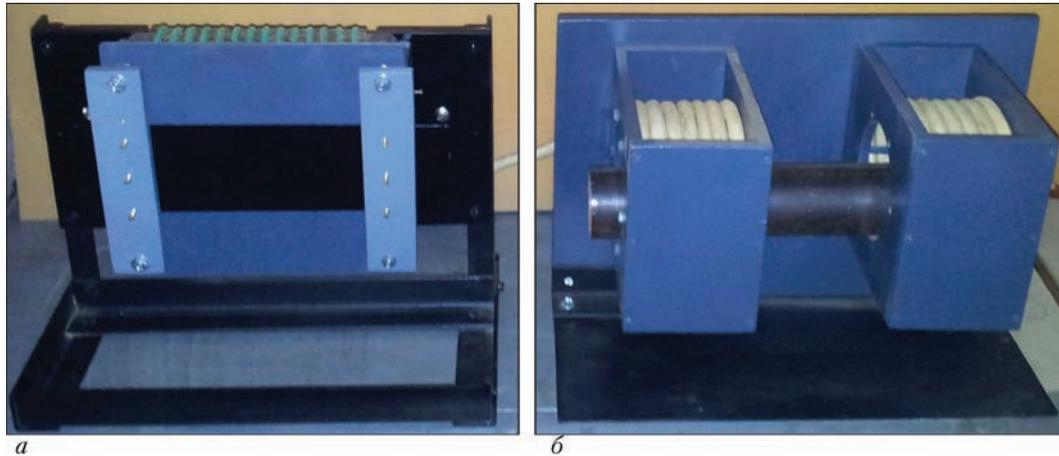


Рис. 5. Варіанти конструкцій ЕМА: а – активатор з плоскою індукційною котушкою (робоча зона 180×180мм²); б – активатор для циліндричних зразків (труба, пруток, профіль). Максимальний діаметр зразків 90 мм.

ка 180×180×16 мм³, магніторушійна сила котушки 1000...4000 амперів-витків), яке активує в пластині з феромагнітного матеріалу загальні питомі втрати. Застосування додаткових елементів магнітопроводу дає можливість виділити тепловтрати на гістерезис, які обумовлено проходженням магнітного потоку через зразок, що замикає створений феромагнітний магнітопровід.

В активаторі (рис. 6) електромагнітне поле двох індукційних котушок (магніторушійна сила котушок 1000...4000 амперів-витків) активує в зразку з феромагнітного матеріалу (який виконує функцію сердечника індукційних котушок) тепловтрати, які дозволяють реєструвати в робочій зоні ЕМА, що розташована між двома котушками, термопроявлення дефектних структур об'єкта дослідження.

Особливості термопроявлення дефектних структур при електромагнітній активації феромагнітних матеріалів. Дослідження особливостей термопроявлення дефектних структур в феромагнітних матеріалах проводилися на експериментальному стенді (див. рис. 1) в ізотермічній камері з вбудованою системою теплозахисних екранів, які захищають об'єкт дослідження від впливу сторонніх джерел ІЧ-випромінювання на формування хибних термоаномалій. Енергетичний режим роботи ЕМА не перевищував 50 % максимальної потужності установки і не був

оптимізований для рішення конкретної задачі. У якості ІЧ-камери використовувався тепловізор FLUKE Ti32 (температурне розрізнення 0,045 °С при 30 °С; поле зору 23°×17°; просторове розрізнення 1,25 мрад; мінімальна фокусна відстань 0,15 м; спектральний діапазон ІЧ-випромінювання, що реєструється, 8...14 мкм). Для виміру температури на опорних точках об'єкта обстеження застосовувався ІЧ фотопірометр Fluke 576 з роздільною здатністю по температурі до 0,01 °С.

На рис. 6–9 наведені термозображення і термограми експериментів, що демонструють термопроявлення різних видів штучно створених дефектів при активації зразків з феромагнетиком в робочій зоні ЕМА. В якості штучно створених дефектів використовувалися циліндричні отвори діаметром 3...12,0 мм в пластині з феромагнітного матеріалу (товщина пластини 1,5...6,0 мм), в які запресовано і зашліфовано діелектричну речовину, сталь, мідь, латунь, графіт та нанесено лакофарбове покриття.

На рис. 6 показано термопроявлення різних видів штучно створених дефектів у зразку з феромагнетиком (пластина 80×70×2 мм³, сталь 30) при активації зразка в робочій зоні ЕМА без контакту з полюсами. Як видно з термограми 4, при електромагнітній активації зразка протягом 11...18 с перевищення амплітуди термоаномалій в області дефектів D_1 (графіт), D_2 (мінеральна суміш) і D_3 (сталь) щодо фоно-

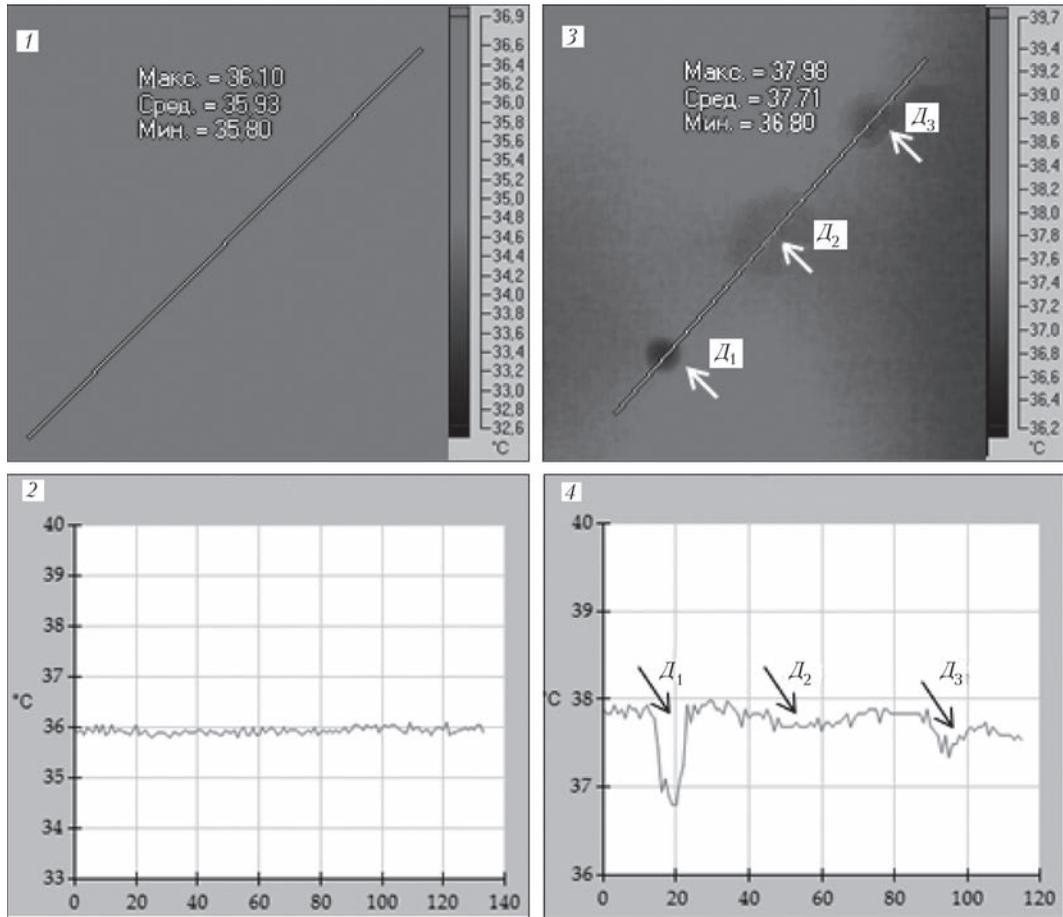


Рис. 6. Термопроявлення штучно створених дефектів у зразку з феромагнетика (пластина $80 \times 70 \times 2 \text{ мм}^3$, сталь сталь 30) при активації в ЕМА: 1 і 2 – термозображення і термограма (уздовж лінії, що перетинає місце розташування дефектів) зразка до початку електромагнітної активації; 3 і 4 – термозображення і термограма (уздовж лінії, що перетинає місце розташування дефектів) зразка під час електромагнітної активації

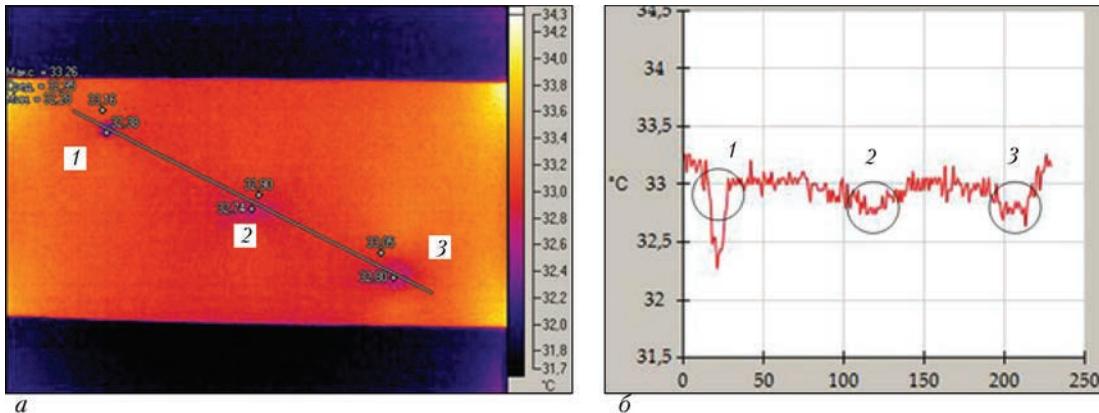


Рис. 7. Термопроявлення штучно створених дефектів (зразок – пластина $300 \times 80 \times 2 \text{ мм}^3$, сталь 30) при активації в ЕМА (зразок контактує з полюсами) протягом 9 с): 1 – графіт; 2 – латунь; 3 – мідь

вої температури досягає значень $1,0 \dots 1,2$, $0,2 \dots 0,35$ і $0,4 \dots 0,68 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно в залежності від теплофізичних властивостей і розмірів штучно створених дефектів.

На рис. 7 показано термопроявлення аналогічних дефектів (1 – графіт, діаметром 6 мм; 2 – латунь, діаметром 6 мм; 3 – мідь, діаметром 10 мм) на пластині ($300 \times 80 \times 2 \text{ мм}^3$, сталь 30) з нанесеним лакофарбовим покриттям при активації в ЕМА за схемою контакту зразка з полюсами. Амплі-

туда негативних термоаномалій на дефектах 1, 2 і 3 (рис. 7, б) досягає $0,78 \dots 1,0$, $0,16 \dots 0,25$ і $0,25 \dots 0,35 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно при активації зразка протягом 9...16 с. Значне зниження амплітуди термоаномалій на дефектах з латуні і міді відносно дефекту, який сформовано діелектричною речовиною, пояснюється великою теплопровідністю цих металів, що значно знижує градієнт температури на межі розподілу феромагнетика і неферомагнітного матеріалу дефекту.

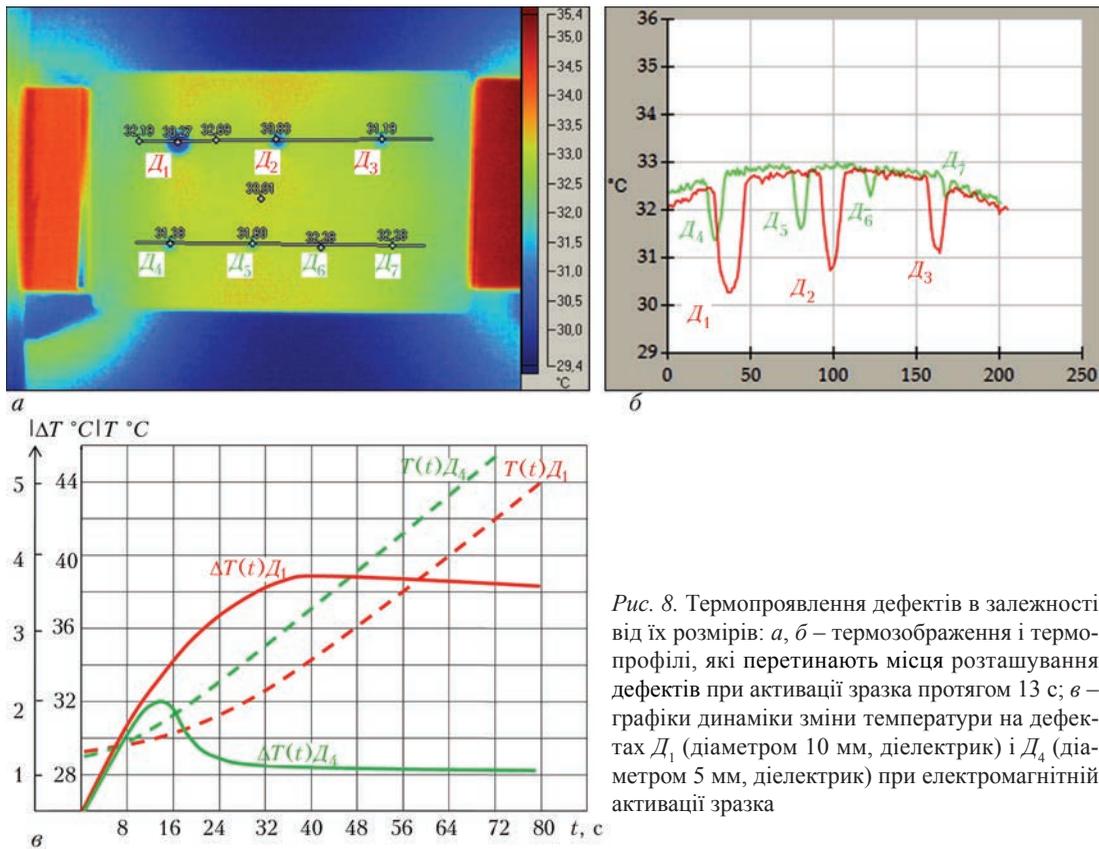


Рис. 8. Термопроявлення дефектів в залежності від їх розмірів: а, б – термозображення і термопрофілі, які перетинають місця розташування дефектів при активації зразка протягом 13 с; в – графіки динаміки зміни температури на дефектах D_1 (діаметром 10 мм, діелектрик) і D_4 (діаметром 5 мм, діелектрик) при електромагнітній активації зразка

Залежність теплофізичних параметрів термопроявлення дефектів від їх розмірів проілюстровано на рис. 8. Зразок – пластина $130 \times 80 \times 6$ мм³, сталь 30. Дефекти D_1 – D_7 – це циліндричні отвори діаметром 10; 7; 6; 5; 4; 5; 3 і 2 мм відповідно, в які запресовано і зашліфовано діелектричну речовину та на поверхню зразка нанесено лакофарбове покриття. Зразок активувався електромагнітним полем протягом 80 с за схемою на рис. 4. Як видно із термозображень і термопрофілей (рис. 8, а, б), амплітуда негативних термоаномалій залежить від розмірів дефектів, які рееструються. Динаміку зміни амплітуди термоаномалій на дефектах D_1 (діаметром 10 мм) і D_4 (діаметром 5 мм) показано на графіках (рис. 8, в). Для дефекту D_1 амплітуда термоаномалії стабілізується на 36 с дії активації і досягає $3,6 \dots 3,7$ °С. Максимальне значення амплітуди термоаномалії на дефекті D_4 досягається на 14 с дії активації (2 °С) і встановлюється на рівні 1,1 °С на 32 с дії активації.

На рис. 9 показано термопроявлення дефектів на зразку (пластина $130 \times 80 \times 2$ мм³, сталь 30), товщина якого у два рази менша за товщину зразка, який розглянуто вище (див. рис.8), а умови електромагнітної активації однакові. Циліндричні отвори дефектів D_1, D_3 – D_8 (діаметром 10; 6; 5; 7; 3; 2 і 5 мм відповідно) заповнені діелектричною речовиною, дефект D_2 (діаметр 6 мм) – сталлю У7. Як видно із термозображень (рис. 9, в, г) дефект,

який сформований феромагнітним матеріалом (сталь У7) має значно меншу амплітуду термопроявлення, ніж діелектричні дефекти.

Динаміку зміни амплітуд термоаномалій на дефектах D_1 (діаметром 10 мм, діелектрик), D_2 (діаметром 5 мм, сталь У7) і D_4 (діаметром 5 мм, діелектрик) показано на графіках (рис. 9, б). Для дефекту D_1 амплітуда термоаномалії стабілізується на 32 с дії активації і досягає $3,7 \dots 3,9$ °С. Максимальне значення амплітуди термоаномалії на дефекті D_4 досягається на 20 с дії активації (1,3 °С) і встановлюється на рівні $1,2 \dots 1,25$ °С на 25 с дії активації. На дефекті D_2 максимальне значення амплітуди термоаномалії досягається на 15 с дії активації (0,22 °С) і стабілізується на 35 с на рівні 0,12 °С (практично на рівні чутливості тепловізора). Досить малий рівень амплітуди термопроявлення «феромагнітного дефекту» (відносно діелектричного) можна пояснити як впливом на процес формування температурної аномалії високої теплопровідності матеріалу дефекту, так і «підігрівом» дефекту за рахунок втрат електромагнітної енергії на гістерезис. Очевидно, що в даному випадку питомі втрати на гістерезис у матеріалі штучно виготовленого дефекту становлять меншу величину, ніж на феромагнітному зразку, тому температура дефекту нижча за температуру зразка, що і є причиною формування негативної термоаномалії. Штучно створений «феромагнітний дефект» можна роз-

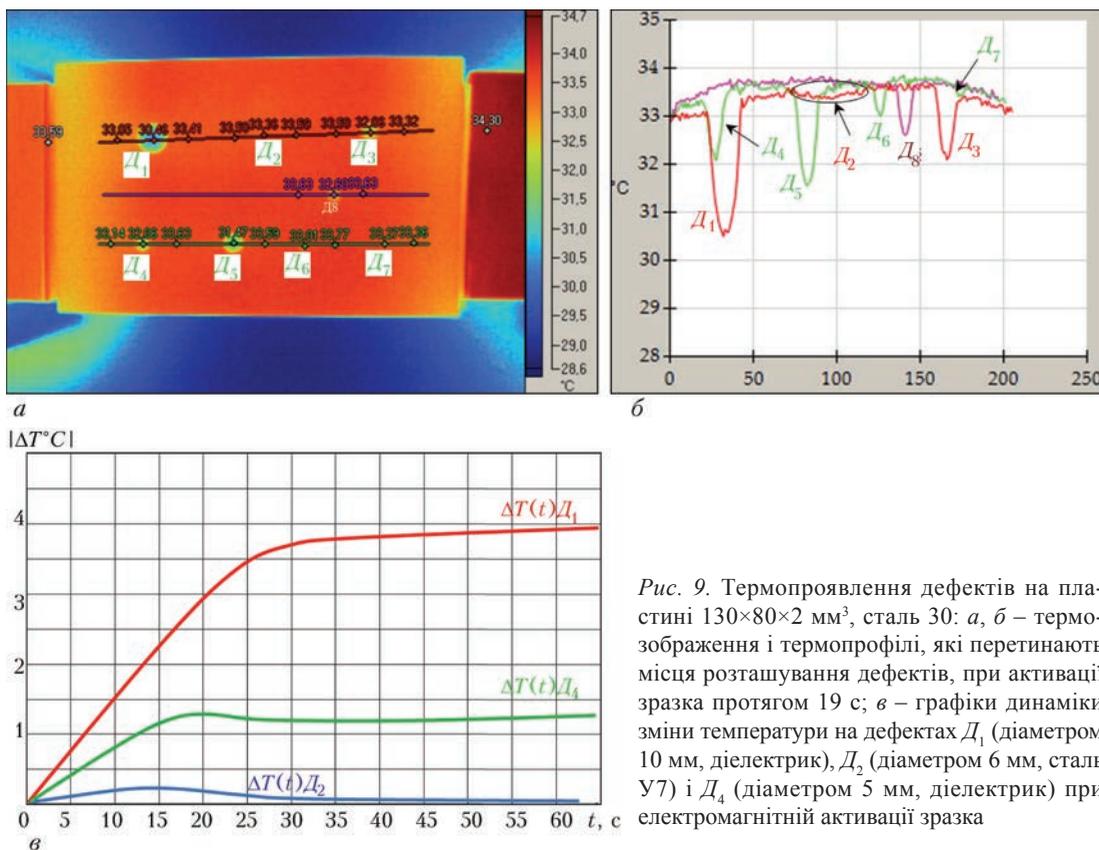


Рис. 9. Термопроявлення дефектів на пластині $130 \times 80 \times 2$ мм³, сталь 30: а, б – термообразиження і термопрофілі, які перетинають місця розташування дефектів, при активації зразка протягом 19 с; в – графіки динаміки зміни температури на дефектах D_1 (діаметром 10 мм, діелектрик), D_2 (діаметром 6 мм, сталь У7) і D_4 (діаметром 5 мм, діелектрик) при електромагнітній активації зразка

глядати як імітацію дефекту структурної неоднорідності феромагнітного матеріалу, який (як свідчить експеримент) можна виявити засобами термографічного контролю при електромагнітній активації зразка.

Висновки

Оснoву розглянутого методу активного термографічного контролю складають принципи візуалізації температурних полів, що збуджуються на неоднорідностях феромагнітного матеріалу і відображують внутрішню структуру (наявність дефектів) об'єктів контролю за рахунок перетворення частини електромагнітної енергії в тепло.

Втрати електромагнітної енергії на тепло обумовлені процесами перемагнічування (гістерезисні втрати) і втратами на вихрові струми (динамічні втрати). Механізм виникнення таких втрат пов'язаний зі зміною магнітної індукції за рахунок руху доменних стінок під дією магнітного поля і залежить від структурної неоднорідності матеріалу.

Виникнення в матеріалі будь-яких типів дислокацій веде до зростання питомого електричного опору, а їхнє зменшення знижує питомий електричний опір. На величину і напрямок вихрових струмів у металі впливають його питомий електричний опір, частота електричного струму, магнітна проникність і конструкційні особливості зразка, а також його розташування відносно напрямку магнітного потоку.

Використання електромагнітної енергії для активації термопроявлення дефектів у тепловому полі істотно підвищує ефективність використання термографічного методу для виявлення дефектів на ранній стадії їхнього виникнення. Метод дозволяє виявляти структури з підвищеною щільністю дислокацій, робити оцінку структурних змін, що відбуваються в конструкційних матеріалах у результаті, наприклад, термічних і деформаційних навантажень.

Експериментальні дослідження, проведені із застосуванням електрофізичної установки підтверджують, що через дисипацію електромагнітної енергії на структурних неоднорідностях (міжфазних і міжзеренних границях, зонах концентрації напружень, мікротріщинах і порах) формуються термоаномалії, які відтворюють картину просторового розподілу теплової енергії згідно з особливостями термопроявлення дефектної структури, стрибками теплофізичних параметрів, показників щільності і пружності матеріалів.

Розроблене у процесі виконання наукових досліджень експериментальне обладнання і методологія його застосування мають самостійне значення і можуть використовуватися при лабораторних дослідженнях як активний термографічний метод НК (дефектоскопії) феромагнітних конструкційних матеріалів із застосуванням електромагнітної активації.

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
2. Vrana J. Mechanisms and models for crack detection with induction thermography / J. Vrana, M. Goldammer, J. Baumann, M. Rothenfusser [et al.] // Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2008. – Vol. 27. – P. 475–482.
3. Mukhopadhyay S. C. A review of material properties estimation using eddy current testing and capacitor imaging Mohd. Amri Yunus / S.C. Mukhopadhyay, G. Sen Gupta // Sensors & Transducers Journal. – 2009. – Vol. 100. – Issue 1. – 2009. P. 92–115.
4. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред Теоретическая физика. – [2-е изд.] пер. и доп. Е. М. Лифшицем и Л. П. Питаевским / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – Т. VIII. – 621 с.
5. Hubert A. Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures / A. Hubert, R. Schäfer // Springer, 1998. – 696 p.
6. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
7. Тимофеев И. А. Удельные потери в ферромагнетике / И. А. Тимофеев // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6 – С. 136–142.
8. Rosakis P. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals / P. Rosakis, A. J. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany // Journal Mech. and Phys. Solids. – 2000. – № 48. – P. 581–607.
9. De Lacheisserie, É. Magnetism: Fundamentals / É. De Lacheisserie, D. Gignoux, M. Schlenker. – Springer, 2005. – V.1. – 507 p.
10. Maugin G. The Thermomechanics of Plasticity and Fracture / G. Maugin. – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – 350 p.
11. Хуберт А. Теория доменных стенок в упорядоченных средах / А. Хуберт. – М.: Мир, 1977. – 306 с.
12. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми; пер. с япон. – М.: Мир, 1987. – 497 с.
13. Базалеев М. І. Термографічний контроль структурних порушень в ферромагнітних матеріалах при активації електромагнітним полем / М. І. Базалеев, В. В. Брюховецький, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 3(37). – С. 13–17.

Considered are the physical-technical basics of thermographic testing as a non-destructive method for examination of structure of ferromagnetic materials at activation by electromagnetic field and mechanisms of formation of temperature anomalies over inhomogeneities in metal by means of transformation of part of electromagnetic energy in heat. Thermal imagining means are used for registration of heat developable defect structures. The principal scheme and technical characteristics of experimental electro-physical unit for testing of structural inhomogeneities in ferromagnetic materials using the method of active thermal imagining thermography are given. Taking into account the materials of experimental investigations, the principles were developed for identifying the temperature anomalies, scientific-technical basics of electro-physical thermal imagining method were generated. *Ref. 13, Figures 9.*

Keywords: thermographic testing, non-destructive testing, electromagnetic activation, heat development of defect structures, active thermal imaging thermography.

Поступила в редакцию
26.04.2016

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», «Идея», «Прессцентр», «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 2003–2014 гг.

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

Подписано к печати 30.05.2016. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 8,54. Усл.-отт. 8,96. Уч.-изд. л. 9,14
Печать ООО «Фирма «Эссе»».
03142, г. Киев, просп. Академика Вернадского, 34/1.