

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б.Е. ПАТОН

Ученые ИЭС им. Е.О. Патона

к.ф.-м.н. **О.И. Бойчук**,

к.т.н. **Е.А. Давыдов**, к.ф.-м.н. **А.Т. Зельниченко**,

д.т.н. **Л.М. Лобанов**,

д.т.н. **А.Я. Недосека** (зам. гл. ред.),

Ю.Н. Посыпайко,

д.т.н. **В.А. Троицкий** (зам. гл. ред.),

к.т.н. **Е.В. Шаповалов**

Ученые институтов и университетов Украины

д.т.н. **В.А. Стрижало**

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

к.х.н. **М.Л. Казакевич**

Ин-т физической химии, Киев, Украина

д.т.н. **О.М. Карпаш**

Ив.-Франк. НТУ нефти и газа, Украина

д.ф.-м.н. **З.Т. Назарчук**, д.т.н. **В.Н. Учанин**

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

д.т.н. **Г.И. Прокопенко**

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

д.т.н. **В.А. Стороженко**

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

д.п.н. **А.Т. Протасов**, д.т.н. **С.К. Фомичов**

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев

д.т.н. **М.Г. Чаусов**

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

Зарубежные ученые

д.т.н. **Н.П. Алешин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ

д.т.н. **В.Л. Венгринович**

Ин-т прикл. физики, Минск, Республика Беларусь

д.т.н. **В.В. Ключев**

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

Адрес редакции

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

ул.Казимира Малевича, 11

г. Киев, 03150, Украина

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

К.Г. Григоренко, Т.В. Юштина

Электронная верстка

Л.Н. Герасименко, Д.И. Серета

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

ISSN 0235-3474

Doi.org/10.15407/tdnk

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Овсиенко М.А., Бойчук О.И., Волошкевич И.Г. Особенности АЭ диагностики. Технология, аппаратура и алгоритмы..... 3

Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Статистический анализ остаточной прочности дефектных трубопроводов при высокотемпературной эксплуатации..... 13

Муравский Л.И., Вороняк Т.И., Стасишин И.В. Новый метод и средства фазосдвигающей интерферометрии для воспроизведения и контроля эволюции поверхностей конструкционных материалов..... 26

Алексенко В.Л., Шарко А.А., Шарко А.В., Степанчиков Д.М., Юренин К.Ю. Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования при изгибе методом акустической эмиссии..... 32

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Киянец И.В., Савицкий В.В. Неразрушающий контроль элементов тонкостенных конструкций преобразуемого объема космического назначения методом ширографии 40

Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 2)..... 47

Баглай А.В., Кипин М.М., Дубина М.А. Вибрационная диагностика редуктора широкополосного прокатного стана 1680..... 53

Деменчук Э.В., Чичиков А.В. Особенности теплового контроля шахт доменных печей..... 58

ИНФОРМАЦИЯ

Календарь выставок и конференций 63

Новые технологии радиационного контроля на основе миниатюрных тердотельных преобразователей 64

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА і НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA і NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Виходить 4 рази на рік

Quarterly issue

Головний редактор Б.Є. Патон

Editor-in-Chief B.E. Paton

ЗМІСТ

CONTENTS

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

SCIENTIFIC-TECHNICAL

Недосєка С.А., Недосєка А.Я., Яременко М.А., Овсієнко М.А., Бойчук О.І., Волошкевич І.Г.
Особливості АЕ діагностики. Технологія, апаратура та алгоритми 3

Nedoseka S.A., Nedoseka A.Ya., Yaremenko M.A., Ovsienko M.A., Boichuk O.I., Voloshkevich I.G.
Features of AE diagnostics. Technology, instrumentation and algorithms 3

Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. Статистичний аналіз залишкової міцності дефектних трубопроводів за високо-температурної експлуатації 13

Milenin A.S., Velikoivanenko E.A., Rozyinka G.F., Pivtorak N.I. Statistical analysis of residual strength of defective pipelines in high-temperature service 13

Муравський Л.І., Вороняк Т.І., Стасишин І.В.
Новий метод та засоби фазозсувної інтерферометрії для відтворення і контролю еволюції поверхонь конструкційних матеріалів 26

Muravsky L.I., Voronyak T.I., Stasyshyn I.V.
New method and means of phase shifting interferometry for reproduction and control of structural material surface evolution 26

Алексенко В.Л., Шарко А.А., Шарко А.В., Степанчиков Д.М., Юренін К.Ю.
Ідентифікація структурних особливостей механізмів деформування при вигині методом акустичної емісії 32

Aleksenko V.L., Sharko A.A., Sharko A.V., Stepanchikov D.M., Yurenin K.Yu. Identification by AE method of structural features of deformation mechanisms at bending 32

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

INDUSTRIAL

Лобанов Л.М., Півторак В.А., Киянець І.В., Савицький В.В. Неруйнівний контроль елементів тонкостінних конструкцій перетворюваного об'єму космічного призначення методом широрографії 40

Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Kiyanyets I.V., Savitsky V.V. Nondestructive testing of elements of thin-walled transformable structures for space applications by shearography method 40

Сучков Г.М., Петрищев О.М., Плєснецов С.Ю.
Щодо чутливості ультразвукового контролю поверхневими хвилями, які збуджуються та приймаються електромагнітно-акустичними перетворювачами (Огляд, ч. 2) 47

Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Plesnetsov S.Yu.
About the sensitivity of ultrasonic testing by surface waves excited and received by electromagnetic-acoustic transducers (Review, p. 2) 47

Баглай А.В., Кіпін М.М., Дубіна М.А.
Вібраційна діагностика редуктора ширококусового прокатного стану 1680 53

Baglai A.V., Kipin M.M., Dubina M.A.
Vibrational diagnostics of a reducer of wide-band rolling mill 1680 53

Деменчук Е.В., Чичиков А.В. Особливості теплового контролю шахт доменних печей 58

Demenchuk E.V., Chichikov A.V. Features of thermal control of blast furnace shafts 58

ІНФОРМАЦІЯ

INFORMATION

Календар виставок та конференцій 63

Calendar of exhibitions and conferences 63

Нові технології радіаційного контролю на основі мініатюрних твердотільних перетворювачів... 64

New technologies of radiation testing based on miniature solid-state transducers 64

Адреса редакції

03150, Україна, м. Київ, вул.Казимира Малевича, 11
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Address

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11, Kazimir Malevich str., 03150, Kyiv, Ukraine
Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

ОСОБЕННОСТИ АЭ ДИАГНОСТИКИ. ТЕХНОЛОГИЯ, АППАРАТУРА И АЛГОРИТМЫ

**С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсиенко,
О.И. Бойчук, И.Г. Волошкевич**

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Сформулированы основные требования к диагностированию конструкций в процессе эксплуатации. Поэтапно рассмотрено получение информации, которую должны выдавать мониторинговые системы после обработки первоначально поступивших данных. Показано, что разработанная совместно с венгерскими специалистами система непрерывного мониторинга конструкций позволяет оценивать и прогнозировать их состояние как в процессе кратковременных испытаний, так и в процессе эксплуатации. Система в состоянии решать практически все основные вопросы, связанные с обеспечением безопасности конструкций при эксплуатации. Библиогр. 18, рис. 9.

Ключевые слова: диагностирование конструкций, акустическая эмиссия, мониторинговые системы, оценка состояния конструкций

Нормативная документация (НД) по технической диагностике (ТД) конструкций [1, 2] требует для принятия решения об их состоянии получения четко определенной информации. Другими словами, техническое диагностирование должно быть направлено на решение таких задач:

- определение вида технического состояния;
- поиск места отказа или неисправности;
- прогнозирование технического состояния.

Для проведения диагностирования необходимо следующее:

- диагностическая модель изделия;
- алгоритм диагностирования и программное обеспечение;
- правила измерения диагностических параметров;
- правила обработки, анализа диагностической информации и принятия решения.

Собственно прогнозирование технического состояния должно определять:

- числовое значение параметров состояния на задаваемый период времени, в том числе и на момент проведения текущего измерения;
- числовое значение остаточного ресурса или допустимой наработки с учетом заданной вероятности;
- нижнюю границу вероятности безотказной работы по параметрам безопасности на задаваемый промежуток времени.

Создание контролирующей аппаратуры с такими возможностями является задачей достаточно сложной. Следует отметить, что практически все традиционные методы неразрушающего контроля (НК) не позволяют получить те параметры дефекта, которые необходимы для принятия решения о состоянии материала конструкции [3].

В то же время, расчеты на прочность методами механики разрушения требуют от специалистов в области НК знания параметров, характеризующих дефект: внутреннее расположение дефекта, его размеры, конфигурацию, положение по отношению к главной оси расчета и ряд других. Исходя из этого, были проведены исследования [3] и показано, что данных, которые дают обычные методы НК, недостаточно для того, чтобы принять взвешенное решение в соответствии с НД по ТД. В некоторых случаях проводили испытания до разрушения конструкции в целом с теми дефектами, которые в ней были заложены при изготовлении. Затем по результатам испытаний одного изделия принимали решение, можно ли эксплуатировать другие подобные изделия. Однако это очень дорогостоящий подход, и позволить оценивать состояние конструкций подобным образом могут лишь организации, обладающие необходимыми достаточно большими ресурсами.

После ввода в эксплуатацию, в процессе наработки появляются новые дефекты или начинают влиять на прочность материала те, которые были пропущены ранее, при контроле на стадии изготовления. Требуется достоверная оценка фактического состояния конструкции, причем без ее разборки и, желательно, без вывода из эксплуатации, на рабочих параметрах. Одним из наиболее перспективных методов контроля в этом случае становится метод, основанный на явлении акустической эмиссии (АЭ), возникающей в материалах при перестройке их структуры под воздействием деформации или других физических полей, при этом возникающие в материале волны могут распространяться на большие расстояния.

Благодаря указанной особенности, контролируемые системы, созданные на базе АЭ, могут решать задачи мониторинга, в том числе непрерывного, и оценки на основе получаемых АЭ данных состояния конструкций независимо от их размеров и условий эксплуатации. Представленные ниже материалы описывают основные возможности современных систем ТД на основе АЭ, которые работают в полном соответствии с НД по техническому диагностированию и могут непрерывно контролировать различные объекты из единого центра. При этом конструкции, оснащенные такой аппаратурой, могут находиться в любой точке земного шара. Применение систем мониторинга возможно и для управления эксплуатацией конструкций. Такие системы работают в Украине уже 18 лет.

Следует отметить, что постепенный переход на непрерывный мониторинг конструкций в процессе их эксплуатации стал мировой тенденцией. Это связано прежде всего с экономическими показателями. Намного выгоднее и дешевле продлить срок эксплуатации конструкции, чем проводить ее плановую замену в соответствии с НД. С другой стороны, непрерывный контроль работоспособности конструкций дает возможность быстро отреагировать на ее состояние и тем самым избежать аварии. Учитывая сказанное выше, отметим, что на заседании Международного института сварки (МИС) в 2015 г. в Хельсинки, где присутствовало более 60 представителей из 17 стран, что демонстрирует важность этого форума, было принято решение о перспективности направления мониторинга технического состояния конструкций и необходимости сосредоточить усилия на его развитии [4].

Основная информация, которую должны выдавать современные мониторинговые системы после обработки первоначально поступивших данных [5, 6]:

- указание места, где формируется и может произойти разрушение;
- определение степени опасности состояния конструкции;
- прогноз разрушающей нагрузки;
- определение предела прочности материала конструкции (для конструкций с существенной наработкой – предела длительной прочности) в любой момент времени ее эксплуатации;
- расчет и оценка остаточного ресурса эксплуатирующейся конструкции;
- оценка энергии, затрачиваемой на развитие разрушения;
- рекомендации по дальнейшей эксплуатации конструкции.

Задача получения этой информации ложится на программное обеспечение (ПО) систем, что по-

казывает его важность в реализации АЭ технологии, поскольку без него измерительный АЭ прибор не имеет самостоятельной ценности.

Отметим, что основные идеи построения прогнозирующих мониторинговых систем с дистанционным контролем были представлены в ИЭС им. Е.О. Патона еще в 1974 г. [7]. С тех пор они постоянно развивались, что привело, в конечном счете, к современной постановке задач мониторинга и управления эксплуатацией конструкций. Параллельно создавались и совершенствовались приборы для АЭ контроля и соответствующее ПО. Сегодня эксплуатируются как стационарные, так и мобильные АЭ системы ЕМА 3-го и 4-го поколений. Технология измерений также постоянно совершенствуется и согласовывается с разработчиком аппаратуры. Стандартизован протокол обмена данными между приборами АЭ и управляющими компьютерами. Отметим, что, начиная с 1997 г., выполнен переход к многозадачному ПО на основе операционных систем Windows, к 2000 г. решен вопрос прогнозирования разрушающей нагрузки по данным АЭ и эксплуатационных параметров. В 2000 г. поставлена и решена задача связи измерительного оборудования с управляющими компьютерами на основе протоколов Интернета и интеграции таких систем в компьютерные сети предприятий. Начиная с 2001 г. на Одесском припортовом заводе (ОПЗ) впервые в Украине начато последовательное внедрение систем непрерывного АЭ мониторинга на наиболее опасных объектах завода, которые сегодня контролируют состояние оборудования цехов перегрузки и производства аммиака, а также ряд других потенциально опасных участков. Опыт эксплуатации мониторинговых систем в сетях показал, в числе прочего, эффективность выбора технологии XML для обмена диагностическими данными между различными компонентами систем и для накопления статистической информации по результатам выданных предупреждений об опасности и прогноза разрушения. В 2004 г. начато оснащение непрерывным АЭ мониторингом аммиакопроводов, проходящих по мостовым переходам, в том числе установлена такая система на километровой участке перехода через р. Днепр. По мере внедрения мониторинговых систем продолжалось их совершенствование, что позволило, в частности, перейти к контролю высокотемпературных объектов и оснастить системами непрерывного мониторинга паропроводы и барабаны котлов на киевских ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6.

В работу действующих на мониторинговых системах алгоритмов оценки состояния материала конструкций заложен метод распознавания образов, что позволило свести ошибки оценок до ми-

нимума и получать результаты при вероятности 0,95 с погрешностью, не превышающей 15 %. Такая точность прогноза состояния материала подтверждена и в рамках совместных со специалистами из Венгрии, Австрии, Германии и Украины испытаниях сосудов давления, показав более чем удовлетворительные результаты [8]. Реальная погрешность прогноза составила менее 5 %.

Рассмотрим более подробно схему решения задачи оценки состояния материала (рис. 1).

Информация с контролируемого объекта постоянно поступает в аналитический блок системы непрерывного мониторинга, где формируется вектор состояния материала (ВСМ). Кроме АЭ информации на вход аналитического блока поступает также необходимая для принятия решения дополнительная информация (давление, усилие, температура и другие данные силового или другого воздействия на конструкцию). После предварительной обработки (фильтрации) этой информации начинает работать блок эталонов (учитель), который производит предварительное сравнение поступающей информации с эталонными значениями, полученными ранее при проведении исследований материалов. Если наблюдается невязка поступающей информации с эталоном, подключается блок коррекции (самообучение). Этот блок пытается нивелировать невязку до допустимой условиями испытания величины. Отвечающая этим условиям информация поступает в блок принятия решения, где формируется оптимальный вариант. Выходной информацией является прогнозное значение разрушения с заданной вероятностью.

Рассмотрим подробнее способы обеспечения указанных возможностей метода АЭ построенной на его основе аппаратурой. Отметим, что помимо систем семейства ЕМА, другие существующие аналоги АЭ систем из перечисленных выше пунктов выходной информации при мониторинге обеспечивают чаще всего только первый и, в редких случаях, второй. Тем не менее, понимание важности всесторонней оценки состояния конструкций постепенно выходит на необходимый уровень, и буквально в последнее время в публикациях и научных темах на Западе все чаще встречается понятие «Structure health monitoring» – дословно «Наблюдение за состоянием здоровья конструкции», в основном как перспективная для разработки тема. В то же время, в Украине эта проблема уже давно решена и нашла относительно широкое внедрение.

Стало это возможным, отчасти, за счет разделения труда между разработчиками АЭ оборудования и специалистами в области оценки состояния материала по данным АЭ. Очевидно, что этим должны заниматься профессионалы разного профиля, решая каждый свою часть задачи, но в тесной координации.

Опыт венгерских специалистов-электронщиков в сочетании с высокой культурой изготовления приборной части АЭ систем в производственных условиях Европы позволили создать высококачественный вариант аппаратуры с высокой скоростью обработки информации, миниатюрными габаритами и малым весом.

Опыт специалистов ИЭС в области прочности и безопасности конструкций, разработке АЭ технологии и соответствующего ПО позволил вести

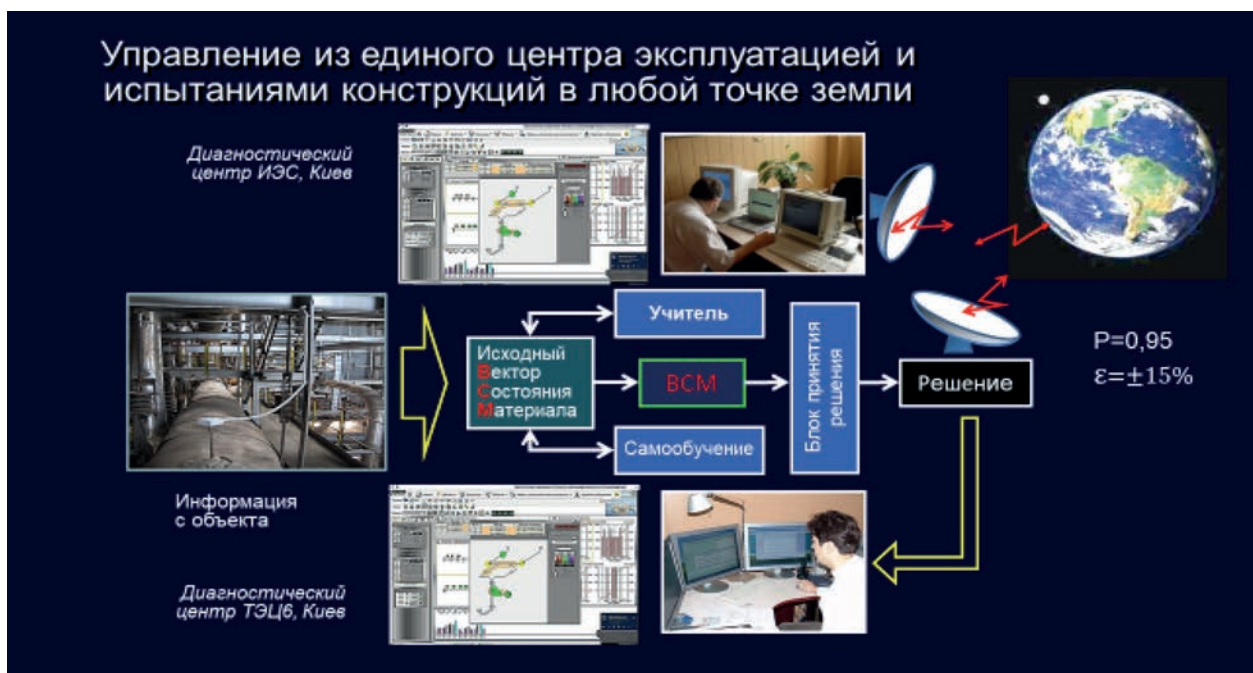


Рис. 1. Схема управления эксплуатацией конструкций, находящихся в любой точке Земли, из единого центра

разработку принципов и методов работы мониторинговых систем путем, который является полностью оригинальным [9].

Несмотря на то, что определение координат источников АЭ выполняют практически все современные многоканальные АЭ системы, технология обработки данных систем ЕМА предусматривает специфические методы выделения отдельных событий и расчета их координат. В частности, используются два различных метода расчета координат – на основе математических формул и с помощью так называемой матричной локации, когда заранее составляется матрица задержек времен прихода сигналов АЭ к датчикам из разных точек для выбранной локационной схемы, а затем получаемые при измерениях задержки сравниваются с матричными и выбираются наиболее подходящие координаты. Для выбора наиболее оптимального метода локации создана автоматизированная система проверки точности локации, задающая виртуальные источники АЭ с последующим расчетом задержек сигналов, а затем вводящая эти задержки в расчетные формулы. Полученная погрешность отображается в виде таблиц и графиков для каждого из заданных для виртуальных источников наборов координат.

После определения координат событий АЭ выполняется их многопараметрический кластерный анализ [10, 11]. При этом зафиксированные системой события АЭ объединяются по заданной группе признаков, и дальнейшая обработка групп полученных событий производится применительно к каждому отдельному кластеру. Приведенная схема (рис. 1) работает независимо для каждого кластера, в результате чего определение уровня опасности и прогноз разрушения относятся к конкретному участку объекта контроля, размеры которого можно варьировать как во время проводимых испытаний, так и при последующей обработке их результатов.

Кластерный анализ дает возможность статистической обработки временных последовательностей групп событий АЭ и сравнения параметров этих групп с соответствующими эталонами. Такая обработка данных не требует исследования формы сигнала АЭ и его спектральных характеристик, что существенно ускоряет оценку и прогнозирование состояния материала, которые происходят в реальном времени практически мгновенно после набора необходимого для оценки количества событий АЭ.

В то же время большинство других исследователей сосредоточились на анализе осциллограмм и спектральных характеристик конкретных сигналов АЭ, что требует значительно более сложной и медленной обработки больших массивов

информации. При этом используют нейронные сети, быстрое преобразование Фурье, Вейвлет-анализ и т. д. Результаты такой обработки дают в итоге мало информации о состоянии материала, поскольку:

- исходный сигнал, излучаемый дефектом, существенно искажается на пути к датчику за счет многочисленных переотражений и потери части спектра;
- полученный датчиком сигнал искажается самим датчиком, взаимодействуя с принимающей его контактной частью, обычно – пьезоэлектрическим элементом;
- сигнал АЭ, преобразованный датчиком в электрический, накладывается на постоянно имеющийся электрический фон, при этом часть спектра урезается самим датчиком;
- в зависимости от частоты дискретизации при оцифровке, часть сигнала теряется, поскольку АЭ является процессом с очень высокой частотой осцилляций.

В связи с этим, в системах ЕМА обработка данных не базируется на анализе осциллограмм, несмотря на возможность их получения. Определение опасности состояния материала выполняется на основе сравнения полученных данных с эталонами.

Прогноз разрушающей нагрузки [12] также основан на анализе эталонов и фактически происходит в едином алгоритмическом блоке с определением степени опасности. Найдя подходящий эталон или построив новый путем самообучения, соответствующий алгоритм определяет, на какой стадии развития разрушения находится материал. Отметим, что для прогноза разрушающей нагрузки требуется знать текущую, поскольку нагрузка является одним из основных параметров ВСМ, входящих, помимо данных АЭ, в эталоны. Преимущества эталонов перед, например, нейронными сетями, заключаются, прежде всего, в том, что обработка происходит на небольших массивах данных и не требует предварительной тренировки. Вероятность прогноза 0,95 при допустимой погрешности $\pm 15\%$ достигается тем, что эталоны были получены на основе многочисленных испытаний образцов и результатов математического моделирования, а затем осуществлен выбор наиболее подходящих из них. После закладки эталонов в программные алгоритмы была выполнена проверка работы прогноза на большом числе образцов и некоторых конструкциях, в частности, доводимых до разрушения [8]. Прогноз разрушения, выполняемый системами ЕМА, официально утвержден УкрЦСМ в виде методики государственной метрологической аттестации.

Наиболее интересными представляются результаты испытаний образцов, которые были вос-

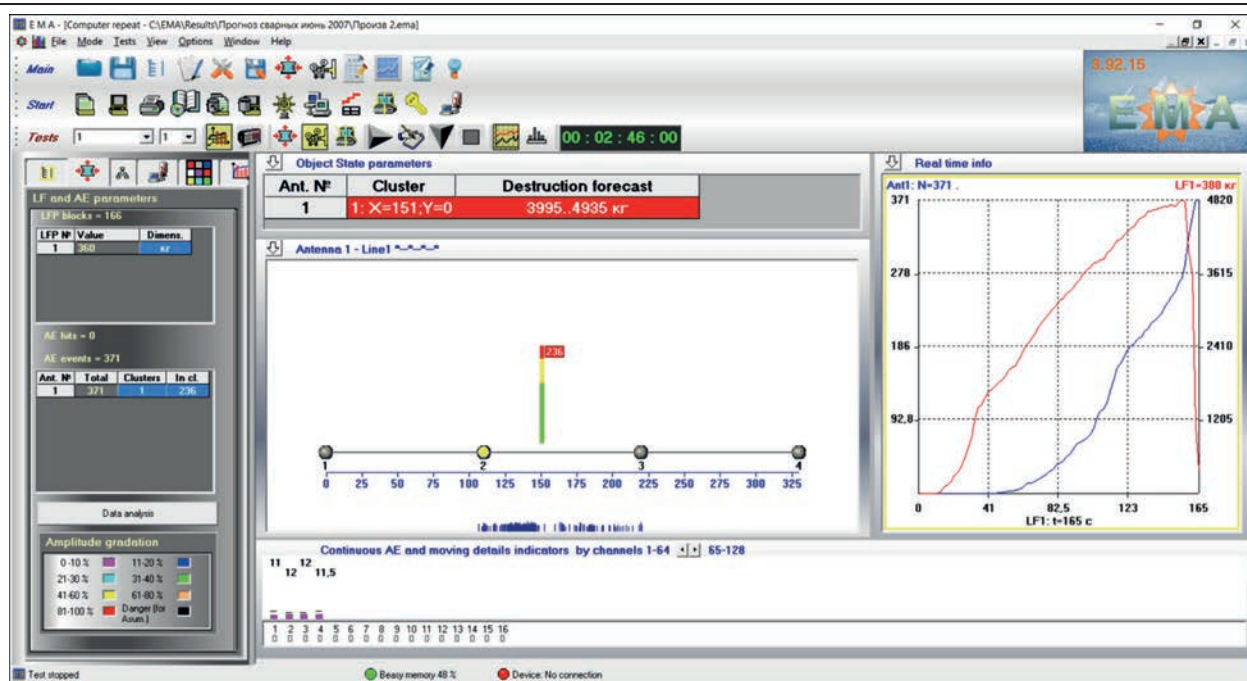


Рис. 2. Окно испытаний программы EMA-3.9 с отображением результатов испытания образца № 2

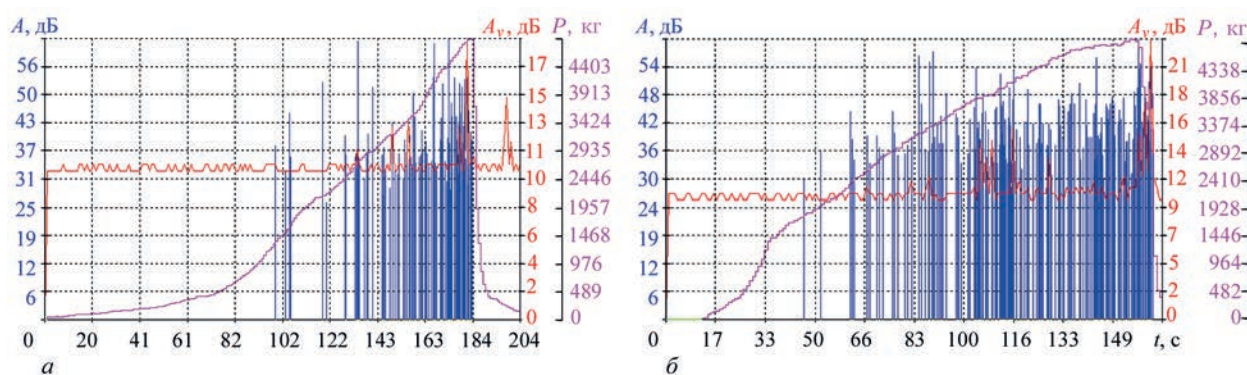


Рис. 3. Результаты испытания образцов № 1 (а) и № 2 (б)

созданы путем сварки частей уже разрушенных образцов, причем металл, из которого они изготовлены, не был известен, и качество сварки не контролировали. После разрушения эксперимент повторяли. Такие испытания позволяли полностью исключить вмешательство экспериментатора в подбор параметров прогноза и убедиться, что метод прогнозирования будет работать при заранее неизвестной прочности материала.

На рис. 2, 3 представлены результаты испытаний двух таких образцов. Локационная антенна состояла из 4-х датчиков АЭ, расположенных на плоском образце с равной базой 110 мм. Показано окно программы EMA с результатами прогноза разрушения образца № 2 и графики непрерывной и дискретной АЭ с наложенной нагрузкой для обоих испытаний. Видно, что число зарегистрированных событий АЭ, их распределение во времени, непрерывная АЭ и характер изменения нагрузки для разных образцов совершенно отличаются. Тем не менее, прогноз в обоих случаях получен с необходимой точностью.

Для образца № 1 прогноз разрушения дал нагрузку в диапазоне от 4400 до 5560 кг. Разрушение произошло при максимальной нагрузке 4892 кг. Для образца № 2 соответствующий диапазон прогноза разрушения составил от 3995 до 4935 кг. Разрушение произошло при максимальной нагрузке 4820 кг. В обоих случаях погрешность укладывается в необходимый диапазон $\pm 15\%$ согласно сертификату системы.

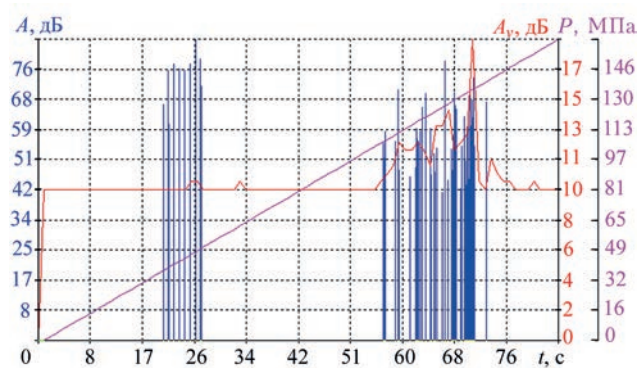


Рис. 4. Результаты испытания образца из композитного материала с концентраторами

На рис. 2 над экраном локации показана область прогноза разрушения. Слева – таблицы АЭ и НЧ данных, справа – график реального времени, отображающий нагрузку и суммарное число событий АЭ. Под экраном локации – значение непрерывной эмиссии по каждому измерительному каналу (показано столбиками).

На рис. 3 показаны следующие параметры испытаний образцов № 1 и № 2 в зависимости от времени: амплитуда АЭ (A , дБ – столбчатый график), непрерывная АЭ (A_n , дБ – линейный график), нагрузка (P , кг – линейный график).

Как видим, независимо от характера АЭ и различного темпа роста нагрузки, прогноз разрушения выполняется с необходимой точностью. Очень важным представляется получение прогноза разрушения для материалов с низкой акустической активностью. Это относится, в частности, к композитным материалам, применение которых в последнее время становится все более широким. Рассмотрим прогноз разрушения композитного материала Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564, испытания которого описаны в работе [13]. Нагрузка в процессе испытания не записывалась, но ее можно внести в результаты эксперимента, зная табличный предел прочности материала 162 МПа и то, что кривая нагружения, как и полагается для хрупкого материала, должна иметь линейный характер. Проведя такой виртуальный эксперимент для образца с высверленными круговыми концентраторами, получили график, представленный на рис. 4. Параметры на графиках в зависимости от времени: амплитуда АЭ (A , дБ – столбчатый график), непрерывная АЭ (A_n , дБ – линейный график), нагрузка (P , МПа – линейный график).

Прогноз разрушения был получен на 62-й секунде при 2-м уровне предупреждения об опасности и составил от 152 до 176 МПа. Считая, что разрушение произошло при максимальной нагрузке 162 МПа, видим, что и в данном случае погрешность укладывается в необходимый диапазон $\pm 15\%$.

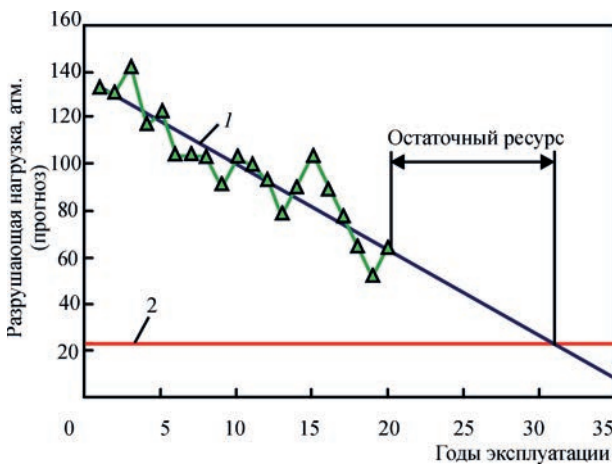


Рис. 5. Условная схема оценки остаточного ресурса (–▲– – разрушающая нагрузка, атм.; 1, 2 – см. описание в тексте)

Данный эксперимент интересен и тем, что сразу получен предел прочности материала, поскольку в качестве параметра нагружения использованы напряжения. Для тех случаев, когда прогнозируется разрушающий параметр нагружения, выраженный в килограммах, уровень жидкости в миллиметрах или рабочее давление в трубе в МПа, несложно выполнить пересчет этих параметров в напряжения и получить в результате прогнозный предел прочности материала. В случае же длительной эксплуатации имеется возможность оценить по этим данным предел длительной прочности [14]. Исследование работоспособности предлагаемой методики определения длительной прочности проводили при контроле трубопроводов горячего промежуточного перегрева пара. Материалы трубопроводов – сталь 15X1M1Ф, диаметр трубы 630 мм с толщиной стенки 25 мм и сталь 12X1MФ, труба диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм. АЭ датчики устанавливали на трубе на расстояние 20 м друг от друга. Контроль выполнялся при давлении пара в трубе, равном 22 атм., температура пара 542 °С. Значения прогнозируемого разрушающего давления, пересчитанные в напряжения, удовлетворительно соответствуют значениям предела длительной прочности сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ, полученным для этих материалов при стандартных испытаниях образцов на длительную прочность.

Высокая достоверность прогноза разрушения позволяет перейти к оценке остаточного ресурса эксплуатирующихся конструкций. В частности, зная предел длительной прочности материалов и разрушающую нагрузку в каждый момент времени эксплуатации конструкции, можно оценить остаточный ресурс материала.

На рис. 5 представлена простейшая условная схема определения ресурса по изменению с течением времени прогнозной разрушающей нагрузки материала конструкции. График позволяет приближенно оценить время до пересечения линии экстраполяции этих данных (1) с линией (2), представляющей рабочую нагрузку. Пересечение этих линий укажет на время разрушения материала. Назначив определенный запас по времени, можно определить допустимый остаточный ресурс мате-

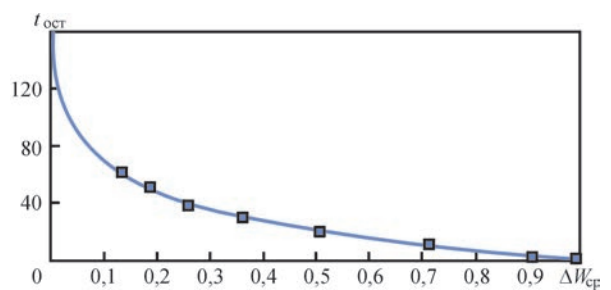


Рис. 6. Номограмма для определения остаточного ресурса по известной поврежденности

риала, и, следовательно, время вывода конструкции из эксплуатации.

Указанный метод оценки ресурса является далеко не единственным. В 2010 г. авторами работы [15], на основании анализа исследований несколькими методами, включая АЭ, весьма большого числа образцов с различной эксплуатационной наработкой (до 48 лет на момент контроля), предложена методика оценки остаточного ресурса. Оказалось, что поврежденность исследуемых материалов, определенная различными физическими методами, имеет четкую зависимость от эксплуатационной наработки, которая может быть описана простыми уравнениями. В частности, зависимость от наработки поврежденности $\Delta W_{cp} = ae^{bt}$, где t – срок эксплуатации; $a = 0,1352$; $b = 0,0333$. На основании этих данных предложена номограмма (рис. 6) для определения ресурса по известной поврежденности материала. Для того, чтобы убедиться в ее работоспособности, выполнили сравнение остаточного ресурса, полученного таким образом по данным поврежденности, определенной на основе результатов АЭ испытаний, АЭ сканирования, измерения ударной вязкости и рассеяния твердости.

Существуют и другие методы оценки ресурса, такие как использование диаграмм Веллера при циклическом нагружении, однако, большая часть из них ориентирована на математический расчет с известными и постоянными параметрами цикла. В случае несистематического изменения нагрузок, периодических остановов эксплуатации объектов контроля, такой расчет выполнить проблематично. В связи с этим, при разработке ПО для оценки ресурса хранилищ аммиака на ОПЗ был применен комбинированный метод (рис. 7). Ресурс постоянно рассчитывается двумя способами – по изменению прогноза разрушающей нагрузки и по номограмме, представленной на рис. 6. Из двух вариантов расчета выбирается наилучший и выводится в соответствующую информационную строку.

Отметим, что прогноз ресурса не следует путать с самим ресурсом конструкции. Реальный ресурс конструкции неизвестен, он всегда снижается и становится известным только после разрушения. Прогнозный ресурс может как снижаться, так и повышаться, в зависимости от улучшения или ухудшения условий эксплуатации конструкции и выбранного метода расчета. В связи с этим прогноз ресурса, в отличие от прогноза разрушающей нагрузки, нормировать невозможно. Прогноз разрушающей нагрузки легко проверяется на образцах, сделать такую проверку для ресурса нельзя (за исключением, как уже было сказано, равномерного циклического нагружения с постоянными параметрами цикла).

Однако несмотря на оценочный характер прогнозного ресурса, отслеживание тенденций его изменения чрезвычайно важно для понимания текущего состояния конструкции. Это еще раз показывает необходимость непрерывного мониторинга потенциально опасных конструкций с оценкой их состояния в реальном времени.

Использование параметров ВСМ при анализе АЭ позволяет выделить из общей энергии разрушения часть, связанную с образованием повреждений, что может существенно уточнить расчеты на прочность и оценить состояние материала в каждый момент времени его эксплуатации под нагрузкой. Теоретическое обоснование данной возможности и подтверждение ее при испытании образцов представлены в работе [16]. Хотя величина энергии, связанная с образованием повреждений в материалах при разрушении, незначительна по сравнению с общей энергией разрушения, она достаточно точно и надежно фиксируется методом АЭ и можно считать вполне допустимым ее использование при определении разрушающей нагрузки материалов. Перспективной представляется автоматизация таких расчетов при дальнейшем совершенствовании АЭ систем.

Вопрос максимальной автоматизации при создании и модернизации АЭ систем ЕМА 3-го и 4-го поколений занимал и занимает одно из ключевых мест. В настоящее время системы непрерывного мониторинга после первоначальной настройки под параметры конкретного объекта работают полностью автоматически, без вмешательства оператора. Специальные программные и аппаратные средства обеспечивают защиту от зависания, перезагрузку и автоматический запуск после отключения электропитания, звуковую и цветовую индикацию в случае возникновения опасности, сгенерированные на основе анализа ситуации рекомендации по дальнейшим режимам эксплуатации объектов мониторинга, долговременный статистический анализ возникновения опасных ситуаций и проблемных участков эксплуатируемых конструкций.

Все сказанное выше позволяет на базе уже существующих и вновь создаваемых систем непрерывного мониторинга внедрить технологию управления эксплуатационными параметрами конструкций и оборудования с целью обеспечения их надежной работы [17]. Для реализации такой технологии требуется организовать обратную связь между мониторинговым оборудованием и системой управления эксплуатацией конструкции. Такая схема работы позволит существенно повысить уровень безопасности эксплуатации конструкций и снизить потенциальную возможность аварий. Сегодня в этом направлении впервые созданы программы и алгоритмы, реализующие автоматически создаваемую рекомендацию

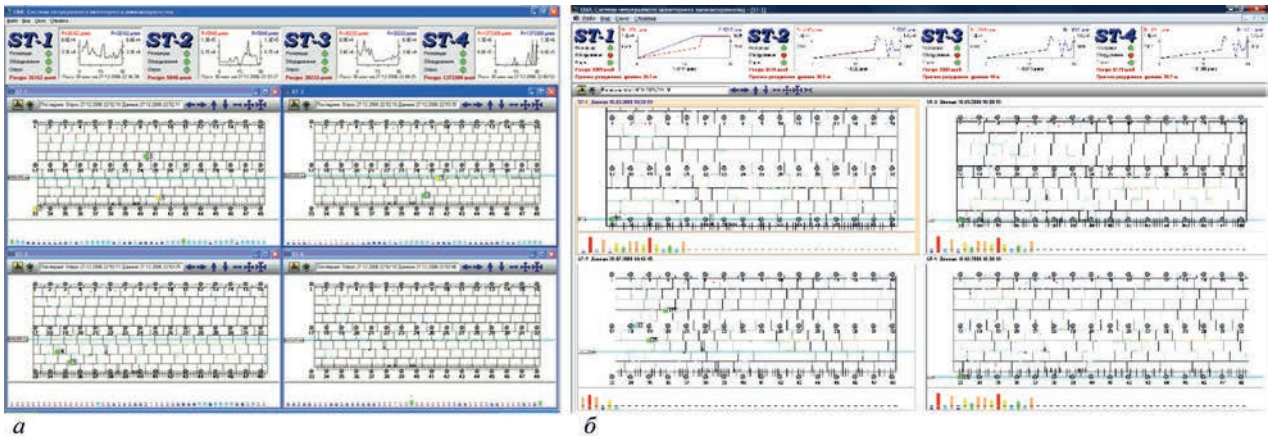


Рис. 7. Первоначальный (а) и обновленный (б) варианты окна программы–интегратора с информацией о ресурсе, выводимой для каждого хранилища аммиака отдельно в верхней части окна (в обновленном варианте помимо ресурса указано также прогнозируемое значение разрушающей нагрузки в виде допустимого уровня наполнения резервуара)

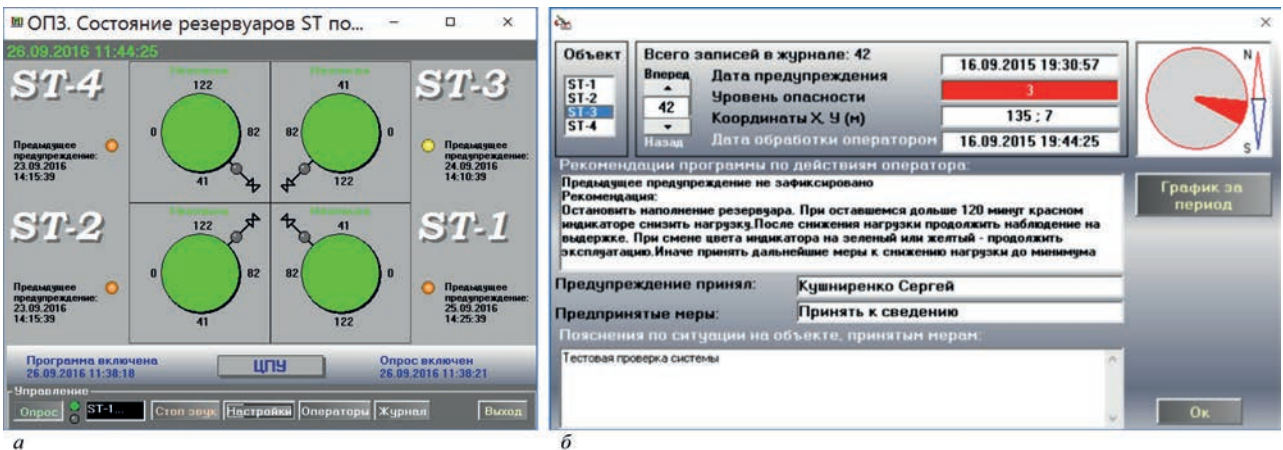


Рис. 8. Интерфейс пользователя индикаторной программы для операторов при контроле состояния хранилищ жидкого аммиака ОПЗ: окно с индикаторами опасности состояния (а); окно журнала, включающее информацию об обработке предупреждений оператором (б). Показывает выданную для данного предупреждения рекомендацию «Нормированный интеллектуальный совет»

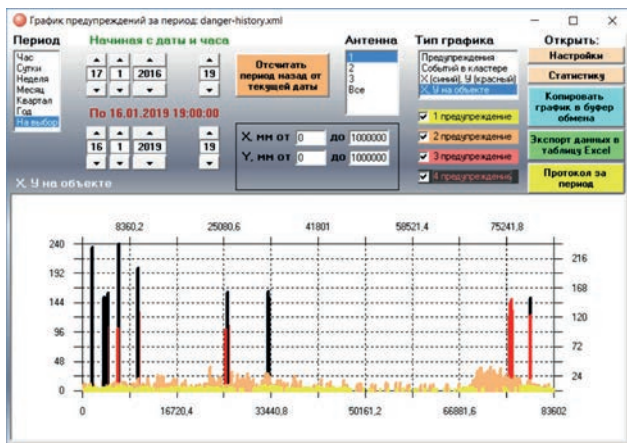


Рис. 9. Окно модернизированной программы обработки статистики предупреждений с графиком предупреждений об опасности за 3 года, показанных относительно длины трубопровода

для оператора по сложившейся ситуации – так называемый Нормированный интеллектуальный совет (НИС). Совет формируется 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 внедрен на практике в рамках системы контроля цеха перегрузки аммиака ОПЗ и предусматривает обратную связь с действиями оператора, а также ведение журнала предупреждений об опасности и предпринятых мерах. Программы, реализующие НИС и взаимодействие с оператором, прошли несколько этапов модернизации, с учетом рекомендаций персонала предприятия (рис. 8), и были дополнены средствами статистического анализа предупреждений (рис. 9) [18].

Отметим в заключение важность авторского надзора за работой систем мониторинга, прежде всего при помощи удаленного доступа по Интернету. Практика показала, что параллельный контроль процесса эксплуатации мониторинговых систем специалистами ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины позволяет эксплуатирующему предприятию быть уверенным в правильности работы системы и оптимальности настроек процесса мониторинга, обеспечении своевременного и максимально полного анализа данных и оперативного реагирования на внештатные ситуации.

Авторский надзор, выполняемый в течение многих лет за системами непрерывного мониторинга

на различных предприятиях Украины, позволил также усовершенствовать ряд аспектов работы систем мониторинга и расширить их возможности. Статистическая информация о состоянии конструкций, получаемая в течение многих лет посредством Интернета, является чрезвычайно важной как с научной, так и с практической точки зрения, представляя знания, которые невозможно было бы получить другим способом.

Выводы

1. Описанная и предлагаемая к применению АЭ технология и аппаратура семейства ЕМА в состоянии решать практически все вопросы, связанные с обеспечением безопасности конструкций и управлением процессом эксплуатации с точки зрения безопасности, поскольку обеспечивают: автоматизированную оценку риска; онлайн прогнозируют разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкций; полностью автоматизированный мониторинг и прогнозирование; автоматизированное управление безопасностью конструкции; простую установку и интеграцию в промышленные компьютерные сети; использование стандартных сетевых протоколов и технологий; сокращение простоя производства; снижение числа плановых остановов; предотвращение аварий; сокращение времени контроля; сокращение времени и расходов на пуск после испытания или ремонта; снижение расходов на оплату процедуры контроля; снижение расходов на принятие решения о состоянии конструкции; упрощение работы контролирующего персонала; снижение расходов на диагностическое оборудование; унификацию процедуры контроля для всего производства; снижение затрат на замену оборудования и ПО за счет унификации обмена данными; снижение расходов на обучение специалистов.

2. Успешно пройдены все этапы развития и адаптации базового варианта технологии для промышленных сооружений. Реализация выполнена на некоторых крупных предприятиях Украины. Предполагаемое развитие технологии: расширение применения на различные классы материалов, конструкций и условия эксплуатации.

3. Для расширения возможностей технологии и аппаратуры необходимы соответствующие алгоритмы, программы и нормативная база.

Список литературы

1. (2009) ГОСТ 27518-87. *Диагностирование изделий. Общие требования*. Действующий от 1989-01-01. Москва, Стандартинформ.
2. (2009) ГОСТ 20911-89. *Техническая диагностика. Термины и определения*. Действующий от 1991-01-01. Москва, Стандартинформ.
3. Варовин А.Я., Карзов Ю.Я., Марголин Б.З. (2006) Проблемы прогнозирования работоспособности конструк-

- ций по данным НК. *В мире неразрушающего контроля*, 4(34), 6–11.
4. (2015) 68-я ежегодная ассамблея международного института сварки IIW-2015. Хельсинки, Финляндия. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 58.
 5. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: альбом*. Киев, Индром.
 6. Недосека А.Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. 4-е изд. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индром.
 7. Патон Б.Е., Кудрявцев И.В., Недосека А.Я. Коротынский А.Е. (1974) О некоторых путях построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций. *Автоматическая сварка*, 9, 1–5.
 8. Недосека А.Я., Недосека С.А., Овсиенко М.А. и др. (2016) Испытание сосудов давления международной группой специалистов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 3–10.
 9. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2005) Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор). *Там же*, 3, 20–26.
 10. Недосека С.А., Недосека А.Я., Овсиенко М.А. (2011) Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат. *Там же*, 2, 5–14.
 11. Недосека С.А., Овсиенко М.А. (2012) Особенности обработки данных акустической эмиссии для сложных и множественных локационных антенн. *Там же*, 2, 7–12.
 12. Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Там же*, 2, 3–9.
 13. Недосека С.А., Недосека А.Я., Шевцова М.А. (2018) Акустическая эмиссия при испытании композитных материалов. *Там же*, 4, 32–36.
 14. Недосека А.Я., Недосека С.А., Смоголь Ю.А., Козаков А.А. (2014) Длительная прочность материалов, работающих при высоких температурах, по данным акустической эмиссии. *Там же*, 4, 17–21.
 15. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там же*, 1, 9–16.
 16. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2018) Оценка энергии, расходуемой на образование повреждений при разрушении материалов, на основе данных акустической эмиссии. *Там же*, 4, 19–23.
 17. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. (2014) Об управлении безопасностью эксплуатации оборудования, несущего рабочую нагрузку. Непрерывный акустико-эмиссионный мониторинг. *Хімічна промисловість України*, 1, 10–21.
 18. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе) *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–18.

References

1. (2009) GOST 27518-87: *Diagnostics of items. General requirements*. Valid from 1989-01-01. Moscow, Standartinform [in Russian].
2. (2009) GOST 20911-89: *Technical diagnostics. Terms and definitions*. Valid from 1991-01-01. Moscow, Standartinform [in Russian].
3. Varovin, A.Ya., Karzov, Yu.Ya., Margolin, B.Z. (2006) Problems of prediction of structure serviceability by NDT data. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, 4(34), 6–11 [in Russian].
4. (2015) 68th Annual Assembly of the International Institute of Welding IIW 2015. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 58 [in Russian].
5. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) *Acoustic emission and residual life of structures: Album*. Kiev, Indprom [in Russian].

6. Nedoseka, A.Ya. (2008) *Fundamentals of design and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton, 4th Ed. Kiev, Indprom [in Russian].
7. Paton, B.E., Kudryavtsev, I.V., Nedoseka, A.Ya., Korotynsky, A.E. (1974) On some methods of construction of automatic information-measuring systems for diagnostics of welded structure reliability. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 1–5 [in Russian].
8. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A. et al. (2016) Testing of pressure vessels by an international expert team. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 3–10 [in Russian].
9. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2005) Diagnostic systems of EMA family. Main principles and architectural features (Review). *Ibid.*, **3**, 20–26 [in Russian].
10. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Ovsienko, M.A. (2011) Influence of methods of acoustic-emission data treatment on formation of AE events and determination of their coordinates. *Ibid.*, **2**, 5–14 [in Russian].
11. Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A. (2012) Features of processing acoustic emission data at application of complex and multiple location arrays. *Ibid.*, **2**, 7–12 [in Russian].
12. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Ibid.*, **2**, 3–9 [in Russian].
13. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Shevtsova, M.A. (2018) Acoustic emission in testing of composite materials. *Ibid.*, **4**, 32–36 [in Russian].
14. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Smogol, Yu.A., Kozakov, A.A. (2014) Long-term strength of materials operating at high temperatures, based on acoustic emission data. *Ibid.*, **4**, 17–21 [in Russian].
15. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Ibid.*, **1**, 9–16 [in Russian].
16. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2018) Evaluation of energy consumed in damage initiation at fracture of materials, based on acoustic emission data. *Ibid.*, **4**, 19–23 [in Russian].
17. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. (2014) On management of operational safety of equipment under working load. Continuous acoustic-emission monitoring. *Khimichna Promyslovisht Ukraina*, **1**, 10–21 [in Russian].
18. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3–18 [in Russian].

ОСОБЛИВОСТІ АЕ ДІАГНОСТИКИ. ТЕХНОЛОГІЯ, АПАРАТУРА ТА АЛГОРИТМИ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.І. Бойчук, І.Г. Волошкевич
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Сформульовано основні вимоги до діагностування конструкцій в процесі експлуатації. Поетапно розглянуто отримання інформації, яку повинні видавати моніторингові системи після обробки даних, які надійшли з об'єкту. Показано, що розроблена спільно з угорськими фахівцями система безперервного моніторингу конструкцій дозволяє оцінювати та прогнозувати їх стан як в процесі короточасних випробувань, так і в процесі експлуатації. Система в змозі вирішувати практично всі основні питання, пов'язані із забезпеченням безпеки конструкцій при експлуатації. Бібліогр. 18, рис. 9.

Ключові слова: діагностування конструкцій, акустична емісія, моніторингові системи, оцінка технічного стану конструкцій

FEATURES OF AE DIAGNOSTICS. TECHNOLOGY, INSTRUMENTATION AND ALGORITHMS

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, O.I. Boichuk, I.G. Voloshkevich
E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office @paton.kiev.ua

The main requirements to diagnostics of structures in operation were formulated. Obtaining the information which should be provided by monitoring systems after processing of initially received data, is considered step by step. It is shown that the system of continuous monitoring of structures developed together with Hungarian specialists, allows evaluation and prediction of the structure state, both during short-term testing and in operation. The system is capable of solving practically all the main questions, related to ensuring the operational safety of structures. 18 Ref., 9 Fig.

Keywords: diagnostics of structures, acoustic emission, monitoring systems, evaluation of the state of structures

Поступила в редакцію
18.01.2019



**ООО «Фрониус Украина»
проводит семинары:**

15 мая 2019 г. — «Автоматизация сварочных процессов»

20 июня 2019 г. — «Роботизация сварочных процессов»

Контакты: тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕФЕКТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Н.И. Пивторак

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Применительно к сварным трубопроводным элементам и сосудам давления, эксплуатируемый при повышенных температурах, предложена численная методика анализа остаточной статической прочности и работоспособности с учетом обнаруженных при технической диагностике дефектов коррозионно-эрозионной потери металла. Для анализа неоднородного напряженно-деформированного состояния в области геометрического концентратора наряду с общепринятыми подходами статистической механики, заключающимися в оценке вероятности разрушения с помощью интегрирования поля напряжений в рамках распределения Вейбулла, был предложен подход аналогичного рассмотрения поля интенсивности пластических деформаций. Это позволяет корректно учитывать кинетику совместного развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести, которая определяет предельное состояние дефектной конструкции под действием конкретной системы эксплуатационного температурно-силового воздействия. Данная методология была реализована на основе комплекса конечно-элементных моделей прогнозирования совместного развития напряженно-деформированного состояния и докритического повреждения трубопроводных элементов с поверхностными дефектами потери металла. Для адекватного количественного прогнозирования вероятности разрушения дефектных трубопроводов из различных материалов были получены значения параметров Вейбулла в зависимости от свойств материала и температуры. Получены эквивалентные диаграммы допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента при различных условиях эксплуатации. Показано соответствие предложенных методик требованиям актуальных нормативных документов. Библиогр. 20, рис. 13.

Ключевые слова: трубопроводный элемент, коррозионно-эрозионный дефект, статическая прочность, вязкое разрушение, вероятность разрушения

Одним из этапов технической диагностики фактического состояния ответственных трубопроводных элементов и сосудов давления является аналитическая оценка их остаточной прочности и работоспособности с учетом обнаруженных дефектов. В случае если рассматриваемый объект эксплуатируется при высоких температурах, необходимо принимать во внимание склонность используемых материалов к высокотемпературной деградации как при расчете их несущей способности, так и при оценке остаточного ресурса. Например, применительно к трубопроводам тепловых электростанций, в случае транспорта жидкостей-теплоносителей, температура которых может достигать 450...580 °С (а согласно новейшим зарубежным проектам – до 700 °С), прочность трубопровода существенно снижается, особенно при наличии локальных концентраторов напряжений (геометрических или обусловленных приобретенной дефектностью). Кроме того, известно, что фактором, ограничивающим ресурс технологических трубопроводов при высокотемпературной эксплуатации, является интенсивное развитие деформаций ползучести, которая приводит к зарождению и развитию докритического повреждения материала и дальнейшему формированию макроскопических дефектов [1]. Поэтому вопро-

сы анализа состояния и оценки остаточного ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводных элементов (ТЭ) в условиях высокотемпературной нагрузки связано с необходимостью прогнозирования докритического повреждения материала и формулировки соответствующих критериев предельного состояния.

Эта задача существенно усложняется при наличии в металле трубопровода дефектов несплошности, в частности, трехмерных коррозионно-эрозионных утонений, вызывающих формирование пространственно неоднородного поля напряжений в стенке конструкции. В таком случае использование упрощенных методик инженерной механики может давать слишком консервативные результаты расчетов прочности, поэтому рациональным является конечно-элементное описание совместного развития напряженно-деформированного состояния (НДС) и докритического повреждения материала вплоть до достижения предельного состояния. Для этого необходима разработка соответствующих моделей поведения упруго-пластической среды, учитывающих различные типы деформирования (упругого, мгновенной пластичности, ползучести, обусловленного структурными превращениями и зарождением микронесплошности материала при докритическом повреждении)

и неравномерное несущее сечение конструкции в процессе разрушения. Кроме того, использование такого подхода позволяет минимально схематизировать реальную геометрию конструкции, в том числе, учитывать наличие локальных коррозионно-эрозионных утонений стенки трубы, обнаруженных во время диагностики ее состояния.

К основным механизмам зарождения несплошности металлов технологических трубопроводов высокого давления, эксплуатируемых при высоких температурах, является вязкое разрушение, которое характеризуется зарождением и развитием пористости материала при определенном уровне накопленных пластических деформаций [2]. Предельное развитие такого типа разрушения в зависимости от величины накопленных необратимых деформаций ползучести определяет остаточный ресурс трубопровода в зависимости от его текущего состояния и условий эксплуатации. Максимальное время до наступления предельного состояния трубопровода может служить характеристикой степени эксплуатационного повреждения типа коррозионно-эрозионных потерь металла. Однако неравномерность распределения напряжений и различная склонность металла к разрушению при одинаковых условиях внешней нагрузки требует использования консервативных предположений, в частности, коэффициентов запаса по разным входным данным. Альтернативным подходом является применение интегральных характеристик склонности конструкции к разрушению, в частности, вероятностный анализ на основе статистики Вейбулла [3]. Но классические модели статистической теории прочности Вейбулла, предусматривающие зависимость вероятности разрушения от величины напряжений в материале, не применимы для описания высокотемпературного нагружения, так как развитие деформаций ползучести не сопровождается соответствующим повышением напряжений. Поэтому необходимо создание альтернативных подходов, рассматривающих пластическую деформацию, как меру склонности к разрушению. Для адекватных количественных оценок вероятности разрушения элементов технологических трубопроводов необходимо определить соответствующие параметры статистической теории разрушения как функции свойств материала и температуры.

Целью настоящей работы является построение комплексной конечно-элементной модели развития НДС технологических ТЭ с обнаруженными коррозионно-эрозионными утонениями стенки, реализация методики статистического анализа НДС таких конструкций для оценки остаточной прочности и определения характерных особен-

ностей влияния условий эксплуатации и степени коррозионно-эрозионного износа на склонность трубопровода к разрушению.

С практической точки зрения, одним из важных механизмов разрушения сварных ТЭ и сосудов давления в условиях эксплуатации при повышенных температурах и существенной силовой нагрузке (в частности, внутренним давлением), когда реализуются условия развитого пластического течения по механизму ползучести, является вязкое разрушение. Так, в процессе накопления необратимых деформаций мгновенной пластичности ϵ^{mp} и ползучести ϵ^c может быть достигнута предельная деформационная способность материала, что приводит к транскристаллитному разрушению металла по механизму порообразования. Согласно гипотезе Леметра [4], зарождение и дальнейшее развитие докритического повреждения такого типа зависит не от механизма пластического деформирования, а от текущей суммарной величины деформации, то есть для рассматриваемого случая, от $\epsilon^p = (\epsilon^{mp} + \epsilon^c)$. Поэтому моделирование НДС конструкции в конкретных условиях эксплуатации должно учитывать как процесс сварки для прогнозирования остаточного состояния после монтажа, так и особенности общего развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести совместно с неравномерно распределенным докритическим повреждением металла в процессе эксплуатации данного ТЭ. Фактическое температурное поле в сечении дефектного трубопровода с учетом разницы между температурами окружающей среды и транспортируемого продукта определялось на основе численного решения нестационарного уравнения теплопроводности [5]. Компоненты тензора деформаций ϵ_{ij} ($i, j = r, \beta, z$, рис. 1) в рассматриваемом случае представляются в виде суперпозиции следующих компонентов [6]:

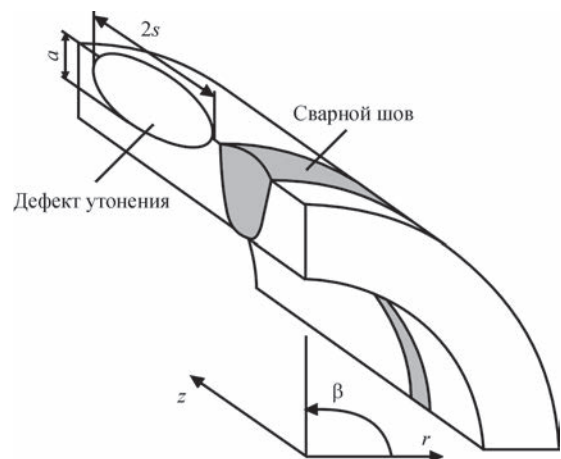


Рис. 1. Схема трубопроводного элемента с дефектом локального утонения стенки в области кольцевого сварного шва

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{mp} + d\varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij} (d\varepsilon_T + df/3), \quad (1)$$

где $d\varepsilon_{ij}^e$, $d\varepsilon_{ij}^{mp}$, $d\varepsilon_{ij}^c$, $d\varepsilon_{ij}^T$ – компоненты приращения тензора деформаций, которые определяются упругим механизмом деформирования, мгновенной пластичностью, ползучестью и температурным расширением, соответственно; f – объемная концентрация равномерно распределенных пор вязкого разрушения; δ_{ij} – символ Кронекера, т. е. $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$.

Текущее приращение деформаций ползучести $d\varepsilon_{ij}^c$ за промежуток времени dt , фигурирующий в (1), может быть выражено с помощью функции ползучести $\Omega = \Omega(\sigma_i, T)$ следующим образом [7]:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T) (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) dt, \quad (2)$$

где T – текущая температура материала; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; σ_i – интенсивность напряжений; σ – средние напряжения.

На разных этапах деформирования степень ползучести определяется или процессом температурной активации, или уровнем механических напряжений. Поэтому $\Omega(\sigma_i, T)$ представляет собой произведение температурной составляющей $\Omega_1(T) = A \exp [G_c/(T+273)]$ и функции напряжений $\Omega_2(\sigma_i) = \sigma_i^n$, где n, A, G_c – константы [8].

Решение общей задачи напряженно-деформированного и поврежденного состояния материала сварного трубопровода в условиях высокотемпературной эксплуатации было реализовано путем численного прослеживания деформаций термопластичности и ползучести в рамках конечно-элементной краевой задачи. В этом случае, приращение общих деформаций в каждом конкретном конечном элементе (КЭ) согласно (1) может быть представлено следующим образом [9]:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} = & \left[\Psi + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) + \\ & + \delta_{ij} (K\sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f/3) - \\ & - \left[\frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (3)$$

где $K = \frac{1-2\nu}{E}$ – модуль объемного сжатия; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига; символ «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; Ψ – функция состояния материала, в рассматриваемом случае определяется условием пластического течения.

В (3) фигурирует объемная концентрация равномерно распределенных пор f , наличие которой отличает разработанные модели от классических

методов анализа термомодеформированного состояния сплошной среды. Наличие докритической поврежденности не только имеет аддитивную составляющую в тензоре деформаций, но и меняет поверхность текучести материала Φ , для математического описания которой нашли широкое применение подходы Гурсона, Твергаарда и Нидлмана (так называемая ГТН-модель) [10]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 - (q_3 f^*)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T} \right) - 1, \quad (4)$$

где $q_1 = 1,5, q_2 = 1, q_3 = 1,5$ – константы; f^* – эквивалентная концентрация пор; σ_T – предел текучести материала.

Эквивалентная концентрация пор f^* в (4), учитывающая взаимодействие между отдельными несплошностями, оценивается на основе следующих соотношений:

$$f^* = \begin{cases} f, & \text{если } f \leq f_c; \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c), & \text{если } f > f_c, \end{cases} \quad (5)$$

где f_c – критическая концентрация несплошностей, до которой отдельные поры не взаимодействуют, принято считать $f_c = 0,15$; f_u – концентрация пор, при которой происходит разрушение конечного элемента; $f_u^* = 1/q_1$.

Для корректного описания предельного состояния рассматриваемых конструкций необходимо учитывать деформационное упрочнение металла в условиях статической эксплуатационной нагрузки, а именно, изменение его предела текучести согласно следующему соотношению [11]:

$$\sigma_T = \sigma_T^0 \left\{ 1 + c_1 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + c_2 \left[\ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]^2 \right\} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right)^m \right], \quad (6)$$

где c_1, c_2, m – константы; точкой над переменной обозначено дифференцирование по времени.

Для оценки зарождения пор вязкого разрушения при пластическом течении материала в неизотермическом случае использовался деформационный критерий, согласно которому в некотором объеме металла появляется начальная пористость с концентрацией f_0 при выполнении следующего условия:

$$\chi_k = \int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c(T)} > 1, \quad (7)$$

где $d\varepsilon_i^p = \sqrt{2/3} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$; $\varepsilon_c(T)$ – критическая величина пластических деформаций.

Дальнейший рост концентрации пор вязкого разрушения в процессе пластического деформи-

рования металла подчиняется закону Райса–Трейси, а именно [12]:

$$df = \begin{cases} 1,28 \exp\left(\frac{3}{2} r_{st}\right) d\varepsilon_i^p, & \text{если } r_{st} = \frac{\sigma}{\sigma_i} > 1; \\ 1,28 (r_{st})^{1/4} \exp\left(\frac{3}{2} r_{st}\right) d\varepsilon_i^p, & \text{если } \frac{1}{3} \leq r_{st} \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

Решение краевой задачи нестационарной термопластичности проводилось путем прослеживания общего развития упруго-пластических деформаций, докритического и критического разрушения по вязкому механизму на основе конечно-элементной пространственной модели. Реализация численного прослеживания связана с нелинейностью в физических процессах пластического деформирования и разрушения. Для формального решения нелинейных задач были реализованы соответствующие итерационные процессы, которые позволяют находить состояние конечного элемента, соответствующего условию равновесия. Был использован подход, предложенный В.И. Махненко, и заключающийся в рассмотрении функции состояния материала Ψ , удовлетворяющей следующим условиям на поверхности текучести [13]:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \\ &= \sigma_\tau \sqrt{1 + (q_3 f^*)^2 - 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_\tau}\right)}; \\ \Psi &> \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s; \end{aligned} \quad (9)$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо.

Реализация условий (9) происходит на каждом шаге прослеживания итерационным методом с учетом соответствующей зависимости $\sigma_s(T, \varepsilon^p)$. Компоненты тензора напряжений удовлетворяют уравнениям статики для внутренних КЭ и граничным условиям – для поверхностных. В свою очередь, компоненты вектора перемещения $\Delta \mathbf{U} = (\Delta U, \Delta V, \Delta W)$ удовлетворяют соответствующим условиям на границе. Разрешающая система уравнений в переменных вектора приращения перемещений в узлах КЭ на каждом шаге прослеживания и Ψ -итераций определяется минимизацией следующего функционала:

$$\Delta_1 = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \Delta U_i \Delta S_P^{m,n,r}, \quad (10)$$

где \sum_V – оператор суммы по внутренним КЭ; \sum_{S_p} – оператор суммы по поверхностным КЭ, на которых заданы компоненты силового вектора P_i .

В качестве критерия зарождения макроскопического разрушения использовалась условие хрупко-вязкого разрушения, которое заключается в выполнении одного из трех соотношений [14]:

$$\begin{aligned} \left(\Psi - \frac{1}{2G}\right)_{KP} &\geq \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_i} \approx \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_s(\varepsilon_p, T)}; \\ f^* \rightarrow f_d^* &= \frac{1}{q_1} \exp\left(-\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_\tau}\right); \\ \frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} &> S_K, \end{aligned} \quad (11)$$

где S_K – напряжение микроскола; индекс «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; ε_f – предельная деформационная способность материала; σ_1 – главные напряжения, полученные при конечно-элементном анализе с учетом деформационного упрочнения материала.

Считалось, что КЭ, для которого выполняется одно из условий (11), теряет свою несущую способность, и на его месте формируется макроскопическая несплошность. Дальнейшее нагружение конструкции и развитие макроразрушения, в итоге приводит к лавинообразной потере несущей способности материала в рамках итерационного процесса (9), что можно интерпретировать, как спонтанное разрушение конструкции.

Интегральные вероятностные подходы анализа НДС ответственных конструкций с точки зрения их склонности к разрушению, зачастую, базируются на статистической теории прочности Вейбулла [15]. Она предусматривает, что вероятность инициирования повреждения p является функцией напряженного состояния и может быть выражена с помощью трехпараметрического распределения Вейбулла (σ -метод):

$$p = 1 - \exp\left[-\int_S \left(\frac{\sigma_1 - A_\sigma}{B_\sigma}\right)^{\eta_\sigma} \frac{dS}{S_0}\right], (\sigma_1 > A_\sigma), \quad (12)$$

где S – площадь сечения трубы; S_0 – константа материала, характеризующая пространственный масштаб перехода микроповреждения в макроскопический дефект; $A_\sigma, B_\sigma, \eta_\sigma$ – параметры Вейбулла.

Применимость σ -метода (12) ограничена природой докритического повреждения материала, а именно: если предельному состоянию конструкции будет предшествовать ее существенное пластическое деформирование, вероятность отказа в соответствии с (12) будет почти неизменной из-за незначительного изменения напряжений, тогда как склонность к разрушению будет расти по мере накопления деформаций. Например, известно, что развитие деформаций ползучести в трубах при высокотемпературной эксплуатации приводит к ини-

цированию и накоплению докритической пористости, но при этом не наблюдается соответствующего увеличения напряжений. Более того, при этом имеет место релаксация напряжений определенного типа (например, остаточные напряжения в зоне сварки). Поэтому можно сделать вывод о том, что модели типа (12) применимы для конструкций, предельное состояние которых определяется хрупкими или вязко-хрупкими механизмами макроразрушения (материалы, охрупченные в результате радиационного облучения или насыщения водородом и т. д.), и некоторые из них уже нашли свое применение [16].

Так как предельное состояние трубопровода с выявленной локальной потерей металла преимущественно зависит от вязкого макроразрушения (особенно для пластичных металлов или при высокотемпературной эксплуатации), альтернативой (12) есть модель Вейбулла, основанная на анализе деформированного состояния конструкции (ε -метод):

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\varepsilon_i - A_\varepsilon}{B_\varepsilon} \right)^{\eta_\varepsilon} \frac{dS}{S_0} \right], (\varepsilon_i > A_\varepsilon), \quad (13)$$

где ε – поле интенсивности деформаций, полученных при конечно-элементном анализе; A_ε , B_ε , η_ε – параметры Вейбулла.

Для корректной количественной вероятностной интерпретации НДС дефектного ТЭ согласно (12) или (13) значения параметров Вейбулла должны быть определены на основе серии экспериментальных испытаний или моделирования. Численное прогнозирование является более эффективным с позиции себестоимости и трудоемкости, но требует использования соответствующей методологии конечно-элементного анализа, учитывающей закономерности взаимного развития НДС и докритического повреждения в условиях существенного развития деформаций разного типа, в частности, в рамках приведенных выше моделей, которые были реализованы в виде соответствующих моделей программного пакета Weld Predictions [17, 18]. Определение параметров Вейбулла A_i , B_i , η_i ($i = \eta, \varepsilon$) необходимо для получения корректных количественных результатов вероятностной оценки статической прочности трубопроводов с локальной коррозионно-эрозивной потерей металла. Для этого некоторому состоянию напряжений (деформаций) характерной дефектной трубы должно быть поставлено в соответствие значение вероятности аварийной ситуации с последующим решением обратной задачи определения параметров Вейбулла. Так, при увеличении внутреннего давления можно выделить несколько стадий развития состояния трубопро-

вода, а именно: зарождение микроповреждения в соответствии с (7), инициирование макроразрушения согласно (11), спонтанного роста макроскопического дефекта (трещины, пластической неустойчивости). Первый этап может быть описан вероятностью разрушения $p = 0,01 \dots 0,05$, второй этап – $p = 0,90 \dots 0,95$, третий – $p \sim 1,0$. Наиболее рациональным подходом является анализ второго этапа, так как по сравнению с первым это позволяет учесть больше характеристик материала и применять менее консервативные процедуры, а по сравнению с третьим – не требует сложного рассмотрения развития макроскопического дефекта.

Для упрощения исследований был сделан ряд предположений. Так, коэффициент A_ε характеризует возможность разрушения при сравнительно низких напряжениях. Теоретически существует ненулевая вероятность инициирования разрушения при напряжениях, близких к нулю ($A_\varepsilon = 0$), но этот подход не является рациональным для решения прикладных задач. Более рациональное предположение, которое было использовано в этом исследовании, заключается в том, что вероятностный характер разрушения проявляется при напряжениях, превышающих $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_T)/2$. Этот подход эффективен для статистического анализа сварных конструкций, но достаточно чувствителен к особенностям математического описания.

Что касается величины A_ε , то предполагалось, что для конструкционных материалов ненулевая вероятность разрушения появляется при макроскопическом пластическом деформировании, то есть $A_\varepsilon \approx 0,887\sigma_T/E$, но это значение незначительно по сравнению с интенсивностью пластической деформации в предельном состоянии конструкции, поэтому для упрощения можно считать $A_\varepsilon = 0$. Значение η_σ принимается в диапазоне 3–4, что соответствует значению η_ε около 5. Соответственно, целью анализа полей напряжений и деформаций в дефектной трубе под предельным давлением является определение параметров B_σ и B_ε распределений Вейбулла (12) и (13) в зависимости от свойств материала трубы, что позволит проводить необходимые количественные оценки вероятности разрушения трубопровода с выявленными коррозионно-эрозивными дефектами.

Так, для стальных труб была проведена серия численных экспериментов предельного состояния в зависимости от свойств материала и размера полуэллиптических поверхностных дефектов (входные данные расчетов следующие: $D \times t = 1420 \times 20$ мм, $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 300 \dots 600$ МПа, $f_0 = 0,01$, $S_K = 1000$ МПа, $\varepsilon_c = 0,01$). Решение обратной задачи показало, что зависимости консервативных значений параметров Вейбулла B_σ и B_ε от предела

текучести σ_T трубной стали квазилинейны (рис. 2) и незначительно зависят от размера дефекта (диапазон рассматриваемых размеров дефектов $a = 3 \dots 17$ мм, $2s = 20 \dots 200$ мм, $2u = 20 \dots 200$ мм) [3]. Подобные результаты получены для алюминиевых сплавов различной прочности (рис. 3). При необходимости такие зависимости можно получить для других характеристик трубопроводных материалов (например, ε_c, f_0, E), чтобы выявить влияние свойств материала на вероятность разрушения трубопровода под действием определенной системы внешней нагрузки.

Для проверки правильности предположения о математическом выражении интегральных законов (12) и (13), а также полученных значений коэффициентов Вейбулла, были проведены статистические лабораторные исследования по одноосному нагружению алюминиевых образцов из сплава АМг6. Результаты испытаний показывают существенный разброс статической прочности образцов, но распределение соответствует функции

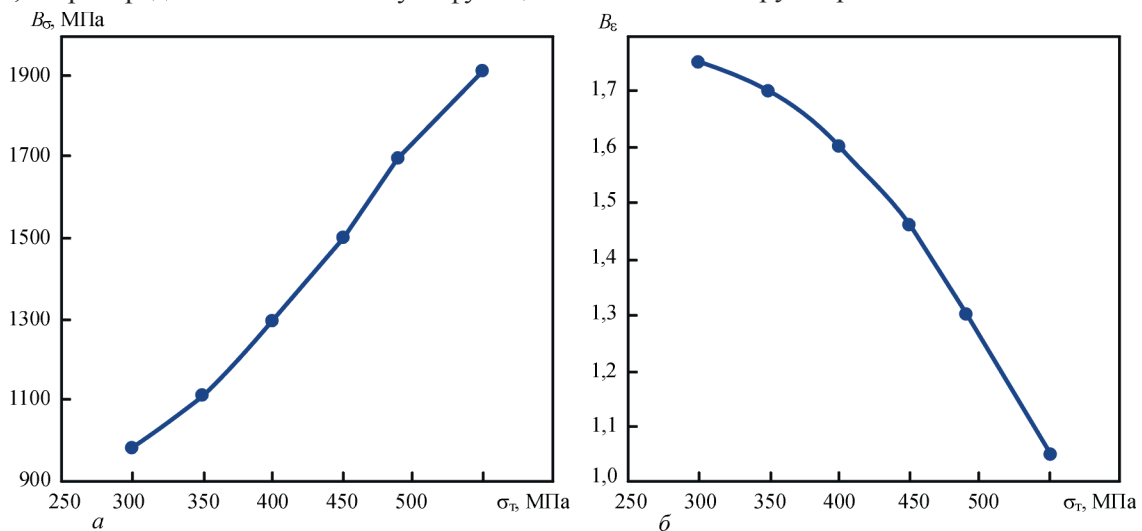


Рис. 2. Зависимости консервативных значений параметра Вейбулла B_σ (а) и B_ε (б) от предела текучести σ_T материала дефектного участка трубопровода (стали) [3]

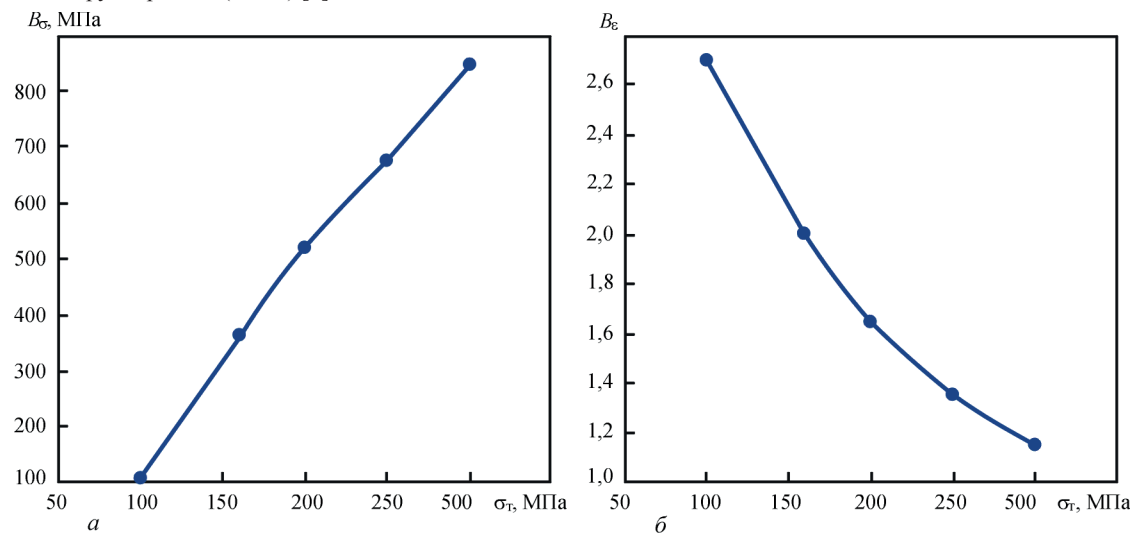


Рис. 3. Зависимости консервативных значений параметра Вейбулла B_σ (а) и B_ε (б) от предела текучести σ_T материала дефектного участка трубопровода (алюминиевые сплавы) [3]

Вейбулла, что было проверено критерием достоверности Колмогорова–Смирнова. Как показано на рис. 4, σ -метод ($A_\sigma = 318$ МПа, $B_\sigma = 360$ МПа, $\eta_\sigma = 4,0$) хорошо коррелирует с экспериментальными данными (уровень значимости α около 0,5), тогда как ε -метод ($A_\varepsilon = 0,004$, $B_\varepsilon = 1,98$, $\eta_\varepsilon = 5,0$) характеризуется хоть и меньшим, но удовлетворительным соответствием ($\alpha = 0,05$).

Для случая высокотемпературной эксплуатации трубопроводов с выявленной дефектностью потери металла (например, эрозии) для оценки вероятности разрушения возможно использование исключительно ε -метода (13) с учетом кинетики накопления деформаций ползучести. Поскольку свойства материала и его склонность к деформации по механизму ползучести зависят от температуры, следует также ожидать зависимость коэффициентов Вейбулла от температуры. Так, для 15Х2НМФА и 10ГН2МФА, которые широко применяются для изготовления технологических трубопроводов АЭС и ТЭС на при-

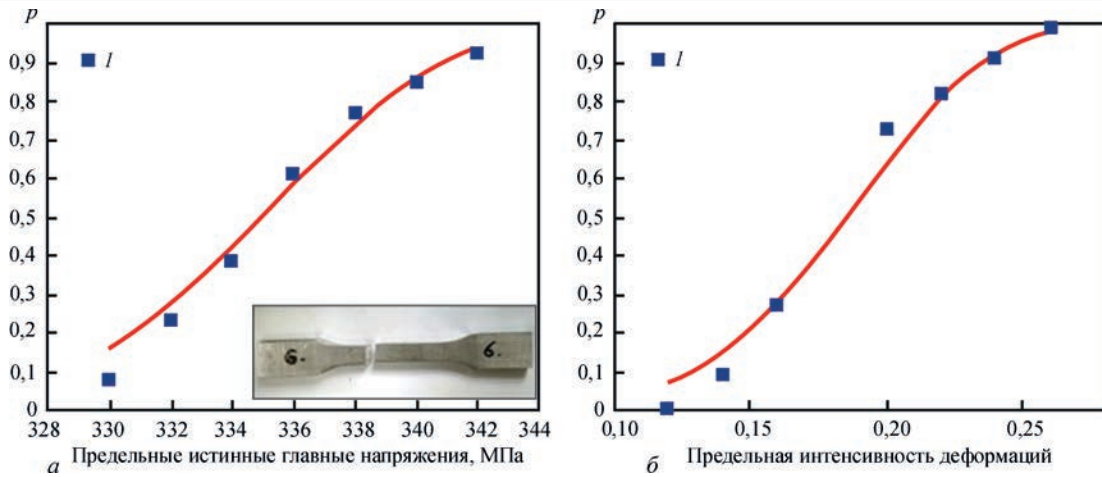


Рис. 4. Сравнение результатов статистической лабораторной проверки вероятности p разрушения алюминиевых образцов (I) в зависимости от предельных главных напряжений (a) и интенсивности деформации (b) с численным прогнозированием в соответствии с разработанными моделями (сплошная кривая)

мере элемента технологического трубопровода с полуэллиптическим дефектом утонения стенки были исследованы закономерности предельного состояния в условиях совместного действия внутреннего давления и высокой температуры. Для этого было исследовано предельное состояние ТЭ ($D \times t = 300 \times 15$ мм) с полуэллиптическим дефектом утонения на внешней поверхности трубы. Коэффициенты функций ползучести следующие [13]: 15X2НМФА – $n = 5,0$, $G_c = -101069$ °C; $A = \exp(69,40)$; 10ГН2МФА – $n = 4,2$, $G_c = -61955$ °C, $A = \exp(34,78)$. Как показали результаты решения температурной задачи, переменная толщина трубы приводит к формированию некоторого градиента температур в области дефекта, что имеет влияние на кинетику накопления деформаций высокотемпературной ползучести, особенно в случае глубокого дефекта. Так, относительно трубопровода из стали 15X2НМФА с внешним полуэллиптическим дефектом, концентратор напряжений в области геометрической аномалии вызывает формирование локально повышенных деформаций (рис. 5). При этом, чем меньше температура эксплуатации трубопровода, тем более локализованным является поле деформаций: на периферии дефекта относительно низкие эксплуатационные напряжения не приводят к существенному увеличению деформаций ползучести, тогда как в области концентратора за то же время уровень деформаций соответствует предельному состоянию, а повышение температуры от 600 до 650 °C приводит к увеличению области локально повышенных деформаций на 40 мм.

Таким образом, различная температура эксплуатации вызывает изменение в распределении накопленных деформаций ползучести в области дефекта утонения стенки трубы, что приводит к различной склонности конструкции к зарождению

и развитию вязкого разрушения. Полученное конечно-элементным расчетом распределение деформаций в стенке трубопровода с полуэллиптическим дефектом локального утонения позволило решить обратную задачу предельного состояния путем постановки в соответствие выполнения критерия (12) вероятности разрушения 0,95 и определить функциональные зависимости параметра B_ϵ от типа материала и температуры эксплуатации. Как показано на рис. 6 как для стали 15X2НМФА, так и для 10ГН2МФА зависимости B_ϵ от температуры квазилинейны для выбранного температурного диапазона. При этом изменение размера дефекта незначительно влияет на значение параметров Вейбулла.

Расчет кинетики поля деформаций в сечении ТЭ с обнаруженными дефектами коррозионно-эрозийных потерь металла позволяет прогнозировать склонность конструкции к зарождению вязкого разрушения и работоспособность с пози-

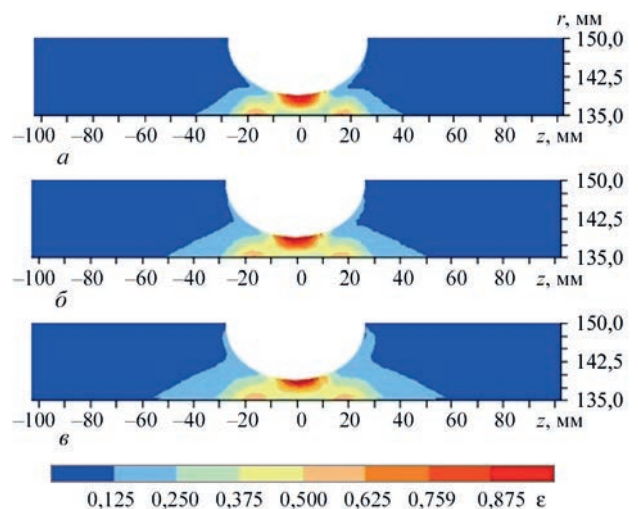


Рис. 5. Распределение интенсивности пластических деформаций в стенке дефектного трубопровода из стали 15X2НМФА при критическом развитии деформаций ползучести: a – 600 °C; b – 620; v – 650

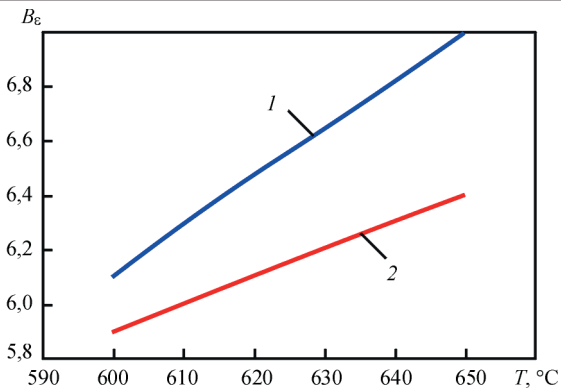


Рис. 6. Зависимости параметра Вейбулла B_e от температуры T для сталей: 1 – 10ГН2МФА; 2 – 15Х2НМФА

ции вероятности макроразрушения. Предложенный подход конечно-элементного расчета в соответствии с описанными выше моделями, дает возможность с минимальной консервативностью описать фактическую геометрию дефектного участка трубопровода (с минимальной схематизацией дефекта) и учесть специфику взаимного влияния текущего НДС и критического повреждения материала ТЭ. Таким образом, интегрирование поля интенсивности пластических деформаций в рамках статистики Вейбулла для вычисления вероятности разрушения в соответствии с системой входных данных по свойствам материала конструкции и условий внешней эксплуатационной нагрузки в рамках реализуемой методологии позволяет с достаточным уровнем консервативности интерпретировать сложное НДС конструкции.

В качестве примера использования этого подхода был рассмотрен элемент магистрального трубопровода из стали 17Г1С-У с полуэллиптическим поверхностным дефектом (входные данные расчетов следующие: $D \times t = 1420 \times 20$ мм, $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 300 \dots 600$ МПа, $f_0 = 0,01$, $S_K = 1000$ МПа, $\epsilon_c = 0,01$). В зависимости от раз-

мера дефекта утонения и поверхности его расположения вероятность разрушения от величины внутреннего давления имеет характерный нелинейный вид (рис. 7). При этом следует отметить, что предложенный подход достаточно чувствителен к изменению геометрии дефектного участка ТЭ и соответствующие изменения в полученных значениях вероятности разрушения p позволяют оценить остаточную статическую прочность конструкции как в рабочем диапазоне внутренних давлений P , так и при нагрузке, близкой к предельной.

Практический интерес представляет сравнение результатов расчетов в рамках приведенной численной методики оценки предельного состояния дефектного трубопровода и нормативных документов. Так, в частности, норвежский стандарт DNV-RP-F101 (1999) [19] разработан для оценки поврежденности магистральных трубопроводов различного типа и позиционируется его создателями как наиболее универсальный, с точки зрения марки стали трубопровода. В Украине для анализа допустимости характерных дефектов трубопроводов совместно Институтом проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины и Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработан нормативный документ ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 [20]. На рис. 8 приведено сравнение результатов вероятностного анализа состояния элемента магистрального трубопровода ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с изолированным дефектом коррозионной потери металла различной глубины a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) с требованиями стандартов DNV-RP-F101 и ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008. Как видно из приведенных данных, высокое соответствие между кривой $P_{0,002}$ (состояние конструкции соответствует вероятности разруше-

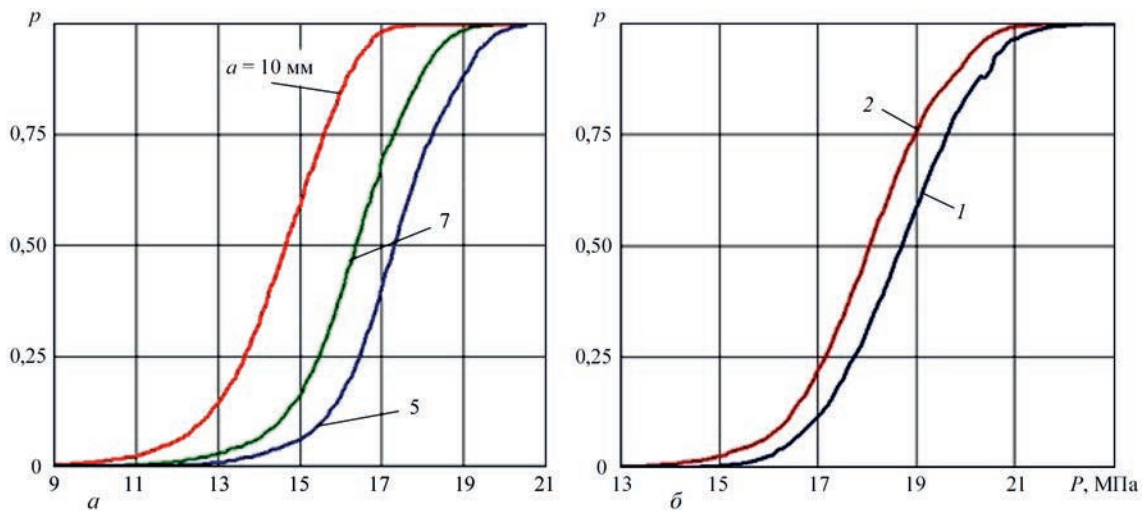


Рис. 7. Зависимости вероятности разрушения p трубопроводного элемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с изолированным дефектом коррозионной потери металла от давления P : a – дефекты различной глубины a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) на наружной поверхности трубы; b – дефект ($2s \times 2u \times a = 50 \times 50 \times 5$ мм) на внутренней (1) и внешней (2) поверхности трубы

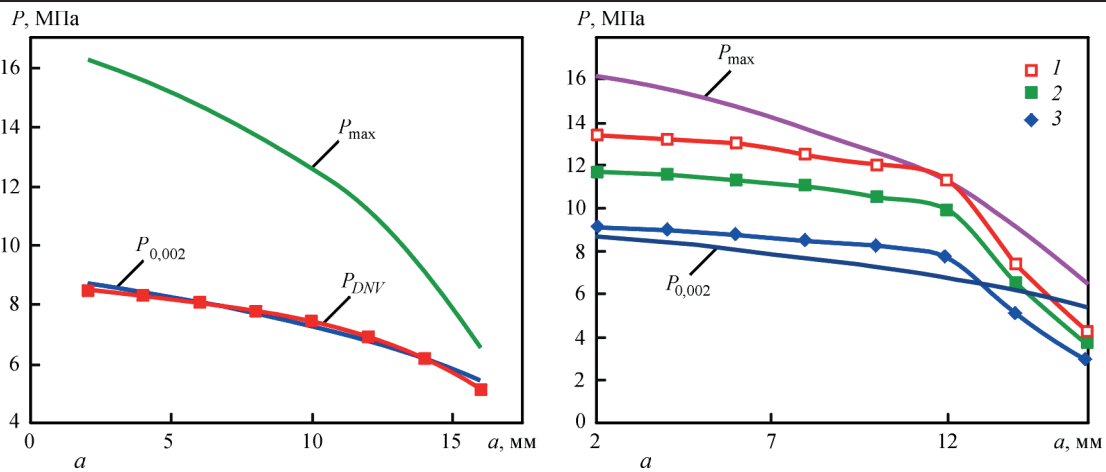


Рис. 8. Сравнение результатов вероятностного анализа состояния элемента магистрального трубопровода ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с изолированным дефектом коррозионной потери металла различной глубины a ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм) с требованиями актуальных стандартов: a – DNV-RP-F101; b – ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 (1 – умеренный; 2 – существенный; 3 – критический)

ния $p = 0,002$) и предельной кривой, рассчитанной в соответствии с методиками DNV-RP-F101. При этом кривая предельной нагрузки P_{max} существенно отличается формой и диапазоном значений давления. Согласно ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008, кривая $P_{0,002}$ достаточно точно описывает состояние дефектного трубопровода с дефектом утонения в случае, если он относится к незначительным. Но следует отметить, что другие категории дефектов (умеренный, значительный, критический) ложатся в диапазоне $P_{0,002} - P_{max}$. Это означает, что каждая из категорий соответствует своему значению вероятности разрушения, которое коррелирует с соответствующей степенью консервативности требований ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008. Заметное несоответствие между разработанной численной методикой и ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 наблюдается при существенных значениях глубины дефекта a , при которых численная оценка показывает менее консервативные результаты. Это объясняется тем, что при разработке требований стандарта учитывался переход от вязкого к

хрупкому разрушению при расчете коэффициентов интенсивности напряжений в области дефекта, и исходя из результатов расчетов, а также сравнения с DNV-RP-F101, условия этого перехода являются избыточно консервативными, и влияние хрупкого механизма разрушения не столь важно даже при увеличенной концентрации напряжений в области глубокого дефекта утонения. Но в случае необходимого соответствия между результатами конечно-элементного расчета и требованиями ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 применимость разработанной методики можно ограничить глубинами дефектов не более половины толщины стенки трубопровода.

Таким образом, в зависимости от требований к вероятности разрушения конкретного ТЭ (максимальной допустимой вероятности разрушения) на основе предложенного подхода возможно построение эквивалентных диаграмм зависимости максимального допустимого давления в трубопроводе от размеров коррозионно-эрозионных потерь металла. Примеры таких диаграмм для рассмотренного выше случая магистрального трубопро-

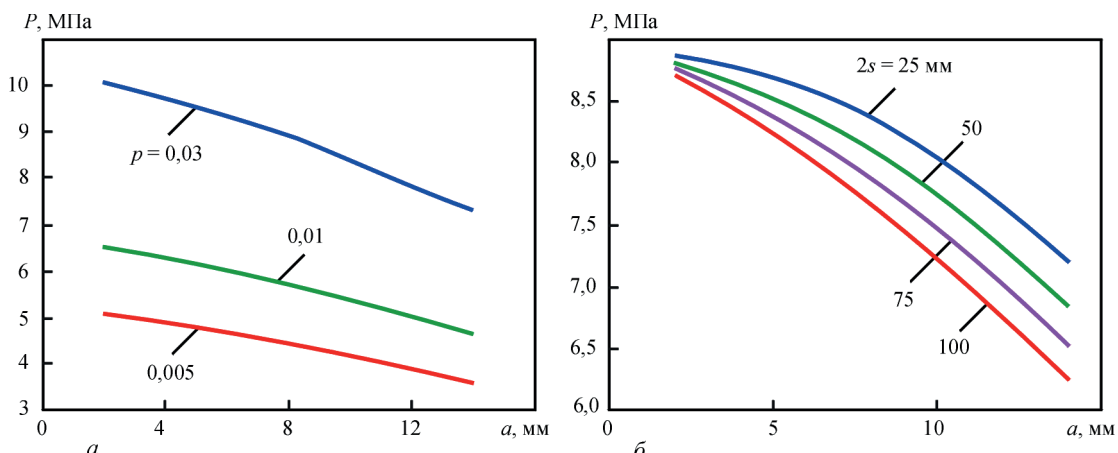


Рис. 9. Эквивалентные кривые допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У): a – в зависимости от критической величины вероятности разрушения ($2s \times 2u = 100 \times 50$ мм); b – в зависимости от длины дефекта утонения ($p = 0,01$, $2u = 50$ мм)

вода с внешним дефектом утонения приведены на рис. 9. Более полно такие данные могут быть представлены в виде поверхностных диаграмм (рис. 10), связывающих длину и глубину дефекта с давлением, которое гарантирует необходимую вероятность аварийной ситуации.

В отличие от рассмотренного выше случая низкотемпературной нагрузки ТЭ с выявленными дефектами локального коррозионно-эрозионного утонения стенки, конкретная система температурно-силовых условий внешней нагрузки определяет не только собственно статическую прочность, но и работоспособность конструкции по причине деградации материала и накопления докритического повреждения. Поэтому наличие локального концентратора напряжений в виде поверхностной геометрической аномалии имеет принципиально иное воздействие на состояние ТЭ с позиции его долгосрочной эксплуатации в условиях высокотемпературной нагрузки. Неоднородность поля напряжений и докритического повреждения обуславливает целесообразность использования именно интегральных методик анализа состояния трубопровода, в частности, с помощью расчета вероятности по модели Вейбулла. Как уже отмечалось выше, классические модели статистической теории прочности Вейбулла, которые заключаются в интегрировании поля главных напряжений, не могут быть применены в случае развитых деформаций ползучести. Но использование альтернативного подхода (13) позволяет реализовать прослеживание состояния исследуемого трубопровода и вероятности его разрушения по мере накопления докритического разрушения.

Так, на примере элемента технологического трубопровода из стали 15Х2НМФА ($D \times t = 300 \times 15$ мм) с полуэллиптическим дефектом ло-

кального утонения стенки на внешней поверхности трубы было исследовано влияние длины дефекта (при фиксированной глубине $a = 7$ мм) и времени выдержки при температуре $T = 625$ °С на предельное внутреннее давление P_{max} . Как показали результаты расчетов (рис. 11), указанные параметры имеют существенное нелинейное влияние на текущую остаточную прочность дефектного ТЭ. Это обусловлено нелинейностью роста концентрации докритического повреждения металла в соответствии с законом Райса–Трейси (8) в процессе высокотемпературного деформирования металла трубопровода.

На основе результатов конечно-элементного решения краевой задачи упруго-пластического деформирования металла ТЭ при совместном воздействии внутреннего давления и температуры интегрированием поля интенсивности деформаций в рамках (13) были получены характерные зависимости вероятности разрушения трубопроводного элемента с локальной полуэллиптической потерей металла на наружной поверхности (рис. 12). Эти результаты

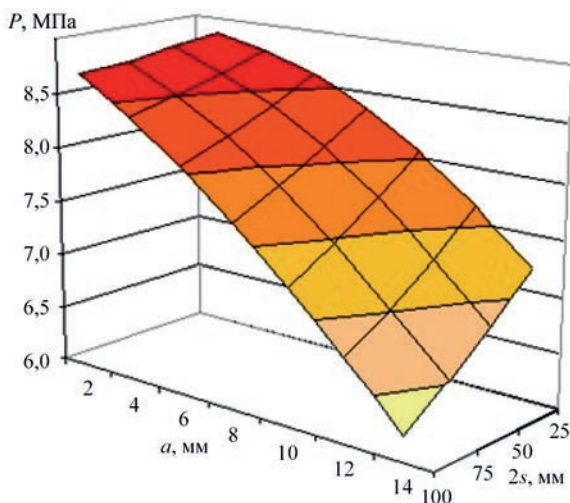


Рис. 10. Эквивалентная поверхность допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента в зависимости от внутреннего давления P , длины $2s$ и глубины a дефекта ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У, $p = 0,01$, $2u = 50$ мм)

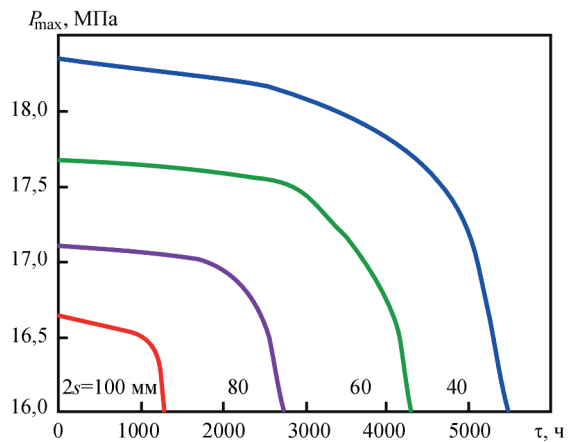


Рис. 11. Результаты численной оценки влияния длины дефекта утонения стенки трубопроводного элемента из стали 15Х2НМФА ($D \times t = 300 \times 15$ мм, $a = 7$ мм) и времени выдержки при температуре $T = 625$ °С на предельное внутреннее давление P_{max}

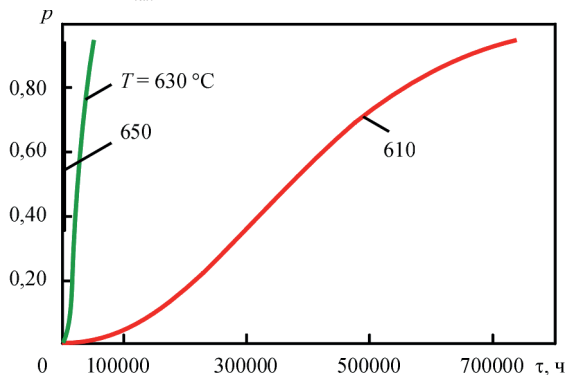


Рис. 12. Зависимость вероятности разрушения p трубопроводного элемента ($D \times t = 300 \times 15$ мм, 15Х2МФА) с эрозионным дефектом ($2s \times 2u \times a = 50 \times 50 \times 7$ мм) от времени высокотемпературной эксплуатации τ при внутреннем давлении $P = 8$ МПа

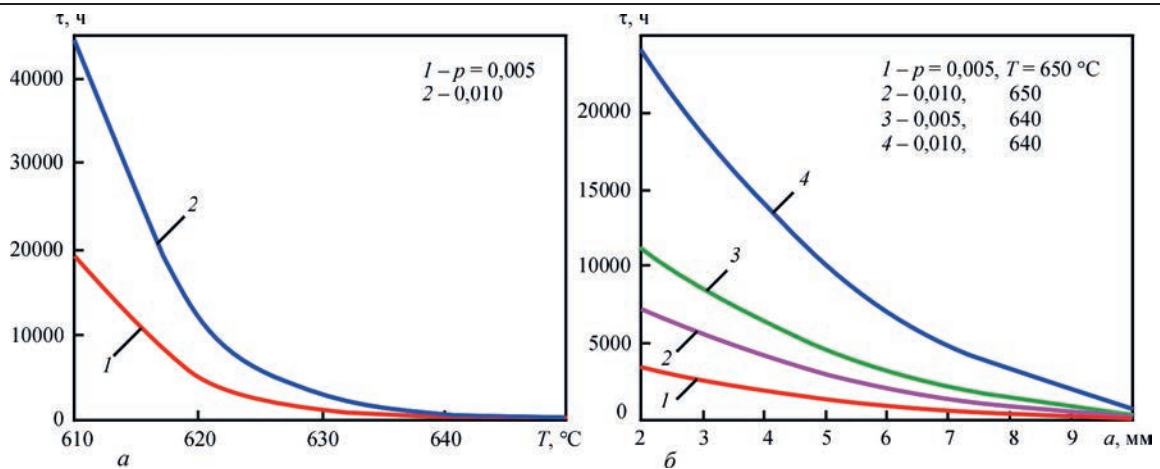


Рис. 13. Эквивалентные диаграммы допустимости дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента ($D \times t = 300 \times 15$ мм, 15X2МФА) с эрозионным дефектом ($2s \times 2u = 50 \times 50$ мм) от температуры эксплуатации (а) и глубины дефекта (б) показывают высокую чувствительность текущей склонности конструкции к разрушению от температуры эксплуатации T : увеличение T с 610 до 630 °С уменьшает предельный срок эксплуатации более чем в 10 раз с соответствующим изменением вероятности разрушения на начальных этапах эксплуатации.

Аналогично, как и для рассмотренных выше случаев коррозионно-эрозионного повреждения элементов магистральных трубопроводов, возможно обобщение результатов анализа влияния дефектности типа локальной потери металла на работоспособность элемента технологического трубопровода в процессе высокотемпературной эксплуатации. Примеры таких диаграмм для рассмотренного ТЭ из стали 15X2МФА ($D \times t = 300 \times 15$ мм) с эрозионным дефектом ($2s \times 2u = 50 \times 50$ мм) как функций температуры эксплуатации и глубины дефекта приведены на рис. 13.

Выводы

1. Разработан комплекс математических моделей и программных средств их реализации для численного прогнозирования совместных процессов термомодеформирования и докритического разрушения металла ответственных сварных ТЭ в процессе высокотемпературной эксплуатации. Предложены критерии зарождения микро- и макроразрушения конструкции при пластическом течении материала по вязкому и хрупко-вязкому механизмам с учетом необратимых деформаций ползучести.

2. Предложена статистическая методика определения склонности к разрушению ТЭ с обнаруженными дефектами локального коррозионно-эрозионного утонения стенки на основе расчетных полей деформаций, накопленных в результате действия внутреннего давления. В основу методики положено интегрирование определенного численно поля интенсивности пластических деформаций в рамках трехпараметрической ста-

тистики Вейбулла для расчета вероятности разрушения. Показано применимость этого подхода для анализа статической прочности и работоспособности трубопроводов, функционирующих при высоких температурах в условиях интенсивного развития деформаций ползучести.

3. На основе результатов статистической обработки результатов решения обратной задачи предельного состояния трубопроводных элементов из трубных сталей и алюминиевых сплавов определены функциональные зависимости параметров Вейбулла от предела текучести металла. Для нержавеющей сталей 15X2МФА и 10ГН2МФА получены температурные зависимости коэффициентов Вейбулла для проведения расчетов вероятности разрушения трубопроводов в процессе высокотемпературной эксплуатации.

4. На примере характерного элемента магистрального трубопровода из стали 17Г1С-У исследованы особенности влияния дефектности типа локальной потери металла на вероятность разрушения под действием внутреннего давления. Показано, что предложенный подход достаточно чувствителен к изменению геометрии дефектного участка трубопровода, и соответствующие изменения в полученных значениях вероятности разрушения позволяют оценить остаточную статическую прочность конструкции как в рабочем диапазоне внутреннего давления, так и при нагрузке, близкой к предельной. Построены эквивалентные диаграммы статической прочности ТЭ с выявленными дефектами локального утонения металла, которые связывают внутреннее давление, размеры дефекта и требуемый уровень вероятности разрушения конструкции. Показано соответствие между результатами расчета допустимости состояния дефектного трубопровода с методиками стандартов DNV-RP-F101 и ДСТУ-Н Б В.2.3-21: 2008 (при небольших глубинах дефектов).

5. Исследованы особенности развития докритического разрушения и предельного состояния трубопроводных элементов из нержавеющей стали в процессе высокотемпературного нагружения. Показана существенная чувствительность склонности конструкции к разрушению от температуры эксплуатации и градиента напряжений, вызванного наличием дефекта утонения. Для трубопроводов из стали 15X2НМФА предложены эквивалентные диаграммы допустимости дефектов в зависимости от их размеров, температуры и давления в трубопроводе с учетом максимально допустимой вероятности разрушения.

Список литературы / References

1. Березина Т.Г., Бугай Н.В., Трунин И.И. (1991) *Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок*. Киев, Техника.
2. Xue J.-L., Zhou C.-Y., Peng J. (2015) Ultimate creep load and safety assessment of P91 steel pipe with local wall thinning at high temperature. *International Journal of Mechanical Sciences*, **93**, 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.01.010>
3. Milenin A., Velikoivanenko E., Rozyuka G., Pivtorak N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **171**, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
4. Lemaitre J., Desmorat R. (2005) *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin, Springer-Verlag.
5. Radaj D. (1992) *Heat Effects of Welding. Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin, Springer Verlag.
6. Makhnenko V. (2013). Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding J.*, **5**, 21–28.
7. Wei Y., Zhang L., Au F.T.K. et al. (2016) Thermal creep and relaxation of prestressing steel. *Construction and Building Materials*, **128**, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.068>
8. Lemaitre J., Chaboche J.L. (1988) *Mecanique des Materiaux Solides. English edition*. Cambridge, Cambridge Univ. Press.
9. Махненко В.И. (1976) *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. Киев, Наукова думка.
10. Xue L. (2008) Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 3343–3366. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.07.022>
11. Cowper, G.R., Symonds, P.S. (1958) *Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams*. Brown Univ. Applied Mathematics Report.
12. Huang Y. (1991). Accurate dilatation rate for spherical voids in triaxial stress fields. *Journal of Applied Mechanics (ASME Transactions)*, **58**, 1084–1086. [doi:10.1115/1.2897686](https://doi.org/10.1115/1.2897686).
13. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
14. Velikoivanenko E., Milenin A., Rozyuka G., Pivtorak N. (2015) Evaluation of operability of the main pipeline with local wall thinning at repair by arc surfacing. *The Paton Welding Journal*, **1**, 18–23. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.01.03>
15. Moshayedi H., Sattari-Far I. (2017). The dependence of Weibull parameters on preloads and its implication on brittle fracture probability prediction using a local criterion. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **87**, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.10.005>
16. Qian G., Niffenegger M. (2013) Procedures, methods and computer codes for the probabilistic assessment of reactor pressure vessels subjected to pressurized thermal shocks. *Nuclear Engineering and Design*, **258**, 35–50. <http://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.01.030>
17. Velikoivanenko E.A., Milenin A.S., Popov A.V. et al. (2014) Methods and Technologies of Parallel Computing for Mathematical Modeling of Stress-Strain State of Constructions Taking into Account Ductile Fracture. *Journal of Automation and Information Sciences*, **46**, 11, 23–35. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v46.i11.30>
18. Velikoivanenko E.A., Milenin A.S., Popov A.V. et al. (2019) Methods of Numerical Forecasting of Serviceability of Welded Structures on Computers of Hybrid Architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, **55**, **1**, 117–127. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>
19. Bjornoy O. (ed.) (2004) Recommended Practice, DNV-RP-F101. *Corroded Pipelines*. Novik, Det Norske Veritas.
20. (2008) DSTU-N B В.2.3-21:2008 *Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Мінрегіонбуд України.
20. (2008) DSTU N B В.2.3-21:2008. *Guidelines. Determination of the remaining strength of trunk pipelines containing defects*. Kyiv, Minregionbud Ukraine [in Ukrainian].

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ДЕФЕКТНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Стосовно зварних трубопровідних елементів та посудин тиску, що експлуатуються за підвищених температур, запропонована чисельна методика аналізу залишкової статичної міцності і роботоздатності з урахуванням виявлених технічною діагностикою дефектів корозійно-ерозійної втрати металу. Для аналізу неоднорідного напружено-деформованого стану в області геометричного концентратора поряд із загальноприйнятими підходами статистичної механіки, що полягають в оцінці ймовірності руйнування за допомогою інтегрування поля напружень в рамках розподілу Вейбулла, було запропоновано підхід аналогічного розгляду поля інтенсивності пластичних деформацій. Це дозволяє коректно враховувати кінетику спільного розвитку незворотних деформацій миттєвої пластичності і повзучості, яка визначає граничний стан дефектної конструкції під дією конкретної системи експлуатаційного температурно-силового впливу. Дана методологія була реалізована на основі комплексу скінченно-елементних моделей прогнозування спільного розвитку напружено-деформованого стану та докритичного пошкодження трубопровідних елементів з поверхневими дефектами втрати металу. Для адекватного кількісного прогнозування ймовірності руйнування дефектних трубопроводів з різних матеріалів були отримані значення параметрів Вейбулла в залежності від властивостей матеріалу і температури. Отримано еквіймовірнісні діаграми допус-

мости дефекту локального стоншення стінки трубопровідного елемента за різних умов експлуатації. Показано відповідність запропонованих методик вимогам актуальних нормативних документів. Бібліогр. 20, рис. 13.

Ключові слова: трубопровідний елемент, корозійно-ерозійний дефект, статична міцність, в'язке руйнування, ймовірність руйнування

STATISTICAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRENGTH OF DEFECTIVE PIPELINES IN HIGH-TEMPERATURE SERVICE

A.S. Milenin, E.A. Velikoivanenko, G.F. Rozynka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office @paton.kiev.ua

A numerical procedure of analysis of residual static strength and performance, allowing for defects of corrosion-erosion loss of metal detected during technical diagnostics, was proposed for welded pipeline elements and pressure vessels, operating at higher temperatures. For analysis of non-uniform stress-strain state in the region of the geometrical stress-raiser, alongside the universally accepted statistical mechanics approaches, consisting in evaluation of fracture probability by integration of the stress field within Weibull distribution, an approach of similar consideration of the field of plastic deformation intensity was proposed. This allows correct evaluation of the kinetics of simultaneous development of irreversible deformations of instantaneous plasticity and creep, which determines the limiting state of the defective structure under the impact of a specific system of operational temperature-force impact. This methodology was realized on the base of a complex of finite-element models for prediction of simultaneous development of the stress-strain state and subcritical damage of pipeline elements with surface metal loss defects. For adequate quantitative prediction of the probability of failure of defective pipelines from different materials, values of Weibull parameters were obtained, depending on the material properties and temperature. Equivalence diagrams of admissibility of the defect of local wall thinning of a pipeline element under different operational conditions were derived. Correspondence of the proposed procedures to the requirements of current normative documents is shown. 20 Ref., 13 Fig.

Keywords: pipeline element, corrosion-erosion defect, static strength, tough fracture, fracture probability

Поступила в редакцію 25.02.2019



Навчальний центр підприємства «ДП-ТЕСТ»
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики
Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

III НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
з міжнародною участю

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

17-20 вересня 2019 р.

Основні теми:

- законодавство в сфері неруйнівного контролю;
- технічні регламенти;
- метрологія і стандартизація;
- навчання та сертифікація персоналу;
- функціонування лабораторії неруйнівного контролю;
- сучасні засоби, приладдя, системи неруйнівного контролю.

В рамках події відбудеться низка практичних семінарів з демонстрацією новітнього обладнання та засобів контролю, круглі столи з дискусійних питань роботи служб неруйнівного контролю на підприємствах України.

Адреса оргкомітету:

03061, м.Київ, вул. Патріотів 103

Тел./факс:(044) 239-12-50, e-mail: support@ndt-ua.com, http://www.dp-test.com

Місце проведення:

Готель «VitaPark Аквадар». Україна, Черкаська обл., смт. Маньківка, вул. Лісова, 1.

НОВИЙ МЕТОД ТА ЗАСОБИ ФАЗОЗСУВНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ І КОНТРОЛЮ ЕВОЛЮЦІЇ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Л.І. Муравський, Т.І. Вороняк, І.В. Стасишин

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: murav@ipm.lviv.ua

Розроблено швидкісний метод трикрокової фазозсувної інтерферометрії з довільними фазовими зсувами опорного променя, який має низку переваг порівняно з відомими подібними методами фазозсувної інтерферометрії і, в першу чергу, не вимагає прецизійного калібрування фазозсувного пристрою та додаткової реєстрації опорного і предметного променів у інтерферометрії, а також забезпечує плавний зсув фази опорного променя. На основі методу трикрокової фазозсувної інтерферометрії створено експериментальний макет 3D профілометра, на якому апробовано нові методики відтворення рельєфу поверхні, екстрагування 3D шорсткості та хвилястості, встановлення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини у зразках алюмінієвого сплаву Д16Т із вирізами за циклічних навантажень та моніторингу еволюції поверхні зразків сталі У8 після наводнювання. Зокрема показано, що макротріщина з найбільшою імовірністю стартує на границі втомної зони передруйнування із того місця, де відбувається найбільший приріст шорсткості поверхні під час втомних навантажень. Під час дослідження впливу водню на рельєф поверхні зразків сталі У8 встановлено, що після насичення воднем її поверхня зазнає деформацій та на ній з'являються блістери. Під час виходу водню з матеріалу деформаційні зміни поверхні продовжуються, найінтенсивніші впродовж перших двох годин після наводнювання і суттєво сповільнюються через два тижні, а блістери збільшуються в розмірах та змінюють форму. Бібліогр. 12, рис. 6.

Ключові слова: фазозсувна інтерферометрія, опорний промінь, шорсткість поверхні, втомна макротріщина, блістери

На сьогодні методи часової фазозсувної інтерферометрії (ФЗІ) вважаються одними із найбільш прецизійних і точних серед усіх інтерферометричних і голографічних технологій реконструкції тривимірних об'єктів. До часової ФЗІ відносять одно-, дво- і багатохвильову, а також інтерферометрію зі скануванням довжини хвилі [1, 2]. Однохвильова часова (ОЧ) ФЗІ характеризується найбільшою прецизійністю вимірювань і найбільшою аксіальною роздільною здатністю, що може досягати одиниць ангстрем [3]. Тому дистанційний контроль рельєфу (ДКР) нанощорстких поверхонь матеріалів, мікроелектромеханічних систем і поверхонь оптичних елементів методами та засобами ОЧ ФЗІ [2] вважається перспективним напрямом досліджень. Однак попри високу аксіальну роздільну здатність та можливість одночасно реєструвати порівняно великі площі ділянок поверхні досліджуваних об'єктів, реєстрація часової послідовності інтерферограм вносить додаткові похибки в результати вимірювань через можливі їх часові зміни за рахунок вібрацій, теплових потоків, еволюції поверхні у часі тощо.

Конкурентними напрямами інтерферометрії нанощорстких поверхонь є просторова (динамічна) ФЗІ та сканувальна інтерферометрія у білому світлі (СІБС). Основна перевага просторової ФЗІ над часовою і над СІБС полягає у можливості одночасної реєстрації трьох-чотирьох зсунутих за фазою інтерферограм поверхні, завдяки чому можна спостерігати швидкоплинні процеси [Л.І. Муравський, Т.І. Вороняк, І.В. Стасишин, 2019]

си зміни поверхні та виключати просторові завади, викликані вібраціями та тепловими потоками під час реєстрації інтерферограм у часі [1]. Водночас нижча порівняно з ОЧ ФЗІ аксіальна і латеральна роздільна здатність та громіздкі оптичні схеми ускладнюють її застосування для прецизійних досліджень. СІБС найбільш поширена серед інтерферометричних технологій просторової (3D) профілометрії поверхні. Про це свідчить інтенсивний розвиток оптичного приладобудування у даному напрямку, який супроводжується створенням серійних 3D профілометрів такими відомими корпораціями і компаніями, як Polytec, ZYGO, Taylor Hobson, Bruker та ін. Однак попри суттєві переваги порівняно з методами когерентної ФЗІ, які полягають у можливості вимірювати рельєф поверхні у широкому діапазоні зміни параметрів шорсткості та у відсутності необхідності фазового розгортання відтворених фазових мап рельєфу поверхні (відсутня «проблема 2 π -невизначеності»), технології СІБС володіють недоліками, які ускладнюють їх застосування для відтворення та ДКР нанощорстких поверхонь. До цих недоліків, на нашу думку, слід віднести такі:

- мала площа досліджуваної прямокутної або квадратної ділянки поверхні, що викликано можливістю сформулювати площину однакової оптичної різниці ходу для опорного і предметного променів мікроінтерферометра, яка не зазнає аберацій, лише у параксіальній області оптичної системи;

– необхідність програмного зшивання просканованих ділянок поверхні, що призводить до виникнення додаткових похибок у відтвореному рельєфі усїєї поверхні;

– низька повторюваність результатів вимірювань під час сканування наношорстких поверхонь, що викликано як похибками аксіальних переміщень оптичної системи мікроінтерферометра відносно поверхні об'єкта дослідження або навпаки, так і нижчою реальною аксіальною роздільною здатністю методу порівняно із ОЧ ФЗІ (порядку 3 нм [3]).

Отже, методи ОЧ ФЗІ залишаються найбільш придатними для відтворення та ДКР наношорсткої поверхні, якщо її рельєф не змінюється у часі і вона не зазнає вібрацій та інших динамічних впливів. Проте такі умови для об'єктів досліджень не завжди можна забезпечити. Тому важливою є проблема створення швидкісних методів ОЧ ФЗІ, які б дали змогу мінімізувати вплив зовнішнього середовища під час реєстрації інтерферограм. Цю проблему може частково розв'язати за допомогою розробленого методу трикрокової ФЗІ з довільними фазовими зсувами опорного променя (ДФЗОП) [4].

Метод трикрокової ФЗІ з довільним зсувом фази опорного променя. Метод розроблено з метою усунення процедури калібрування фазозсувного елемента у схемі двопроменевого інтерферометра, реєстрації інтерферограм за довільних кутів α фазового зсуву опорного променя, а також для пришвидшення процесу реєстрації інтерферограм, використовуючи для цього плавний зсув опорного променя [4]. На відміну від розробленого раніше двокрокового методу [2], він не вимагає реєстрації просторових розподілів інтенсивностей предметного і опорного променів. У методі трикрокової ФЗІ за допомогою трьох цифрових інтерферограм $I_1(i,j)$, $I_2(i,j)$ та $I_3(i,j)$, де i,j – номери пікселів у цифровому зображенні, визначають фазові зсуви між ними α_{21} і α_{31} , або α_{21} і α_{32} , після чого відтворюють згорнуту і розгорнуту фазові мапи (ФМ) $\varphi_{Rw}(i,j)$, $\varphi_R(i,j)$ рельєфу ділянки поверхні, а також виділяють окремо ФМ 3D шоркості $\varphi_r(i,j)$ і хвилястості $\varphi_w(i,j)$, використовуючи для цього оптимальні частоти зрізів просторово-частотного спектра відтвореного рельєфу. Якщо для формування та реєстрації інтерферограм поверхні використовують оптичні схеми інтерферометрів з нормальним падінням предметного променя на об'єкт дослідження, то перетворення фазових мап у просторовий розподіл висот $h(i,j)$ рельєфу поверхні здійснюють за виразом $h(i,j) = \lambda\varphi(i,j)/4\pi$.

Спрощену блок-схему алгоритму реалізації методу наведено на рис. 1.

Розглянемо приклади використання методу для оцінювання втомної довговічності конструк-

ційних матеріалів та контролю еволюції поверхні матеріалу, що перебуває під дією агресивних середовищ.

Встановлення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини. Для оцінювання довговічності та залишкового ресурсу циклічно навантажуваних елементів конструкцій з круглими вирізами, отворами та іншими подібними концентраторами напружень визначають геометричні і структурні параметри втомної зони передруйнування (ВЗП) та циклічної і монотонної (статичної) пластичних зон в околі концентратора. Так, наприклад, розмір ВЗП d^* можна розглядати як критерій розмежування двох основних етапів втомного руйнування, а саме періоду зародження N_i і періоду субкритичного росту N_p мінімальної макротріщини, який використовують для оцінювання втомної довговічності N_f конструкційних матеріалів з отворами за формулою [5]

$$N_f = N_i \Big|_{a_i=d^*} + \int_{d^*}^{a_c} \frac{da}{F[\Delta K]}, \quad (2)$$

де a_i – початкова довжина макротріщини; $a_i = d^*$ критерій переходу мікротріщини у макротріщину; $a_c = f(\Delta K_{fc})$; ΔK_{fc} – циклічна в'язкість руйнування; $F[\Delta K]$ – функція, що описує діаграму швидкостей росту макротріщин; ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень. Отже, щоб оцінити втомну довговічність матеріалу або елемента конструкції з вирізом згідно концепції О.П. Остаха і В.В. Панасюка [5, 6], необхідно спочатку визначити параметр d^* .

Однією із перспективних і найбільш прецизійних вважають інтерферометричну методику визначення параметра d^* , засновану на використанні методу двокрокової ФЗІ з довільним зсувом фази опорного променя. Методика базується на експе-

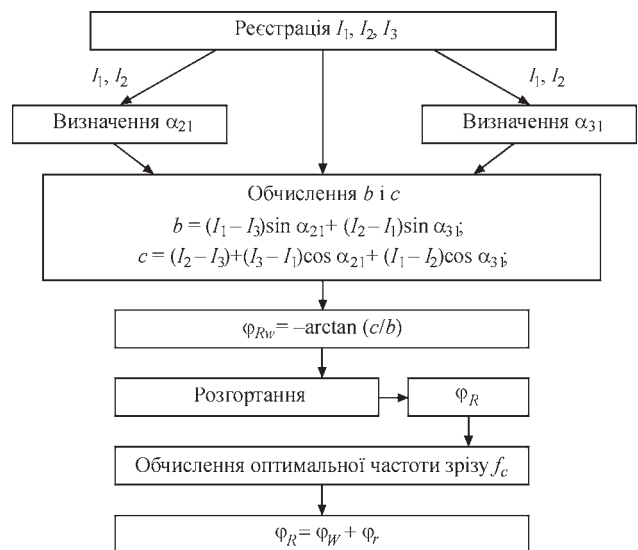


Рис. 1. Блок-схема алгоритму реалізації трикрокового методу ФЗІ

риментально доведеної гіпотезі про те, що максимальна шорсткість поверхні під час циклічних навантажень зразків з круглим вирізом, виготовлених зі сталі 08кп та алюмінієвого сплаву Д16Т, досягається на границі ВЗП [7]. Цю гіпотезу підтверджують також результати отримані Д. Аролюю і К. Вільямсом [8], М. Сураратчай та ін. [9] і К.С. Чаном та ін. [10], які свідчать про зростання локальної шорсткості поверхні металів і сплавів зі зростанням кількості циклів навантажень і, зокрема, про зростання ефективного коефіцієнта концентрації циклічних напружень K_f під час еволюції шорсткості поверхні [8]. З іншого боку, О.П. Осташ і В.В. Панасюк [5, 6] довели, що на границі ВЗП досягається максимум розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_y^*$ [2, рис. 1.68], який пропорційний до K_f , якщо номінальне напруження $\Delta\sigma_{nom}$ є постійним. Отже, на границі ВЗП досягається максимальне значення K_f і, відповідно, досягаються максимальні значення параметрів шорсткості поверхні. Таким чином, розміри ВЗП можна віднайти, якщо обчислити середнє арифметичне значення висоти поверхні обмеженого масштабу S_a у кожній точці ділянки поверхні поблизу краю вирізу, тобто

$$S_a(x', y') = \frac{1}{L_x L_y} \int_{x' - \frac{L_x}{2}}^{x' + \frac{L_x}{2}} \int_{y' - \frac{L_y}{2}}^{y' + \frac{L_y}{2}} |h(x, y)| dx dy \quad (3)$$

де L_x і L_y – базові довжини базової площі $L_x \times L_y$ ($L_x = L_y$) вздовж осей x і y .

Результати вимірювання розмірів ВЗП для зразків, виготовлених зі сталі 08кп та алюмінієвого сплаву Д16Т, отримані у [7], збіглися із задовільною точністю з результатами вимірювань, отриманими за допомогою інших методів.

На основі методики визначення параметра d^* та методу трикрокової ФЗІ було розроблено нову методику визначення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини. В основу методики покладено згадану вище концепцію Осташа і Панасюка [5, 6], згідно з якою максимум розма-

ху локальних напружень $\Delta\sigma_y^*$ досягається на границі ВЗП. Оскільки просторовий розподіл $\Delta\sigma_y^*$ вздовж границі ВЗП неоднорідний, то логічно зробити припущення про те, що у місці максимального $\Delta\sigma_y^*$, тобто у місці максимального значення параметра шорсткості S_a , найбільша імовірність появи і старту втомної макротріщини. За критерієм виявлення місця і моменту старту макротріщини вибирали максимальний градієнт зростання шорсткості у будь-якому пікселі відтвореного рельєфу ділянки поверхні, розташованому на границі ВЗП. Завдяки такому критерію можна не лише визначити місце старту тріщини, але і передбачити найбільш імовірний момент її зародження під час прикладання циклічних навантажень на першому етапі втомного руйнування матеріалу, тобто передбачити кількість циклів N_i .

Експериментальну перевірку цієї методики здійснювали спочатку за допомогою двокрокового методу ФЗІ для компактного зразка зі сталі 08кп з круглим вирізом, аналізуючи розподіл параметра середнього арифметичного відхилення профілю R_a вздовж радіальних ліній, що починались від центра вирізу [2, сс. 98–100]. Результати експериментів показали, що шорсткість на межі ВЗП практично не зростає зі збільшенням кількості циклів крім того місця, де утворюється макротріщина. Саме у цьому місці помітне значне зростання шорсткості поверхні зі збільшенням кількості циклів до тих пір, доки там не утвориться макротріщина. За допомогою методу трикрокової ФЗІ дана методика була вдосконалена шляхом визначення параметра 3D шорсткості S_a , тобто середнього арифметичного значення висоти поверхні обмеженого масштабу на базовій площі $L_x \times L_y$, аналогічного параметру 2D шорсткості R_a вздовж профіля. Величину цього параметра у кожному пікселі відтвореного цифрового зображення рельєфу ділянки поверхні обчислювали за таким виразом [7]:

$$S_a(i', j') = \frac{1}{PQ \Delta_x \Delta_y} \sum_{(i'=i-p+\frac{P-1}{2})} \sum_{(j'=j-q+\frac{Q-1}{2})} |h(i, j)| \Delta_x \Delta_y, \quad (4)$$

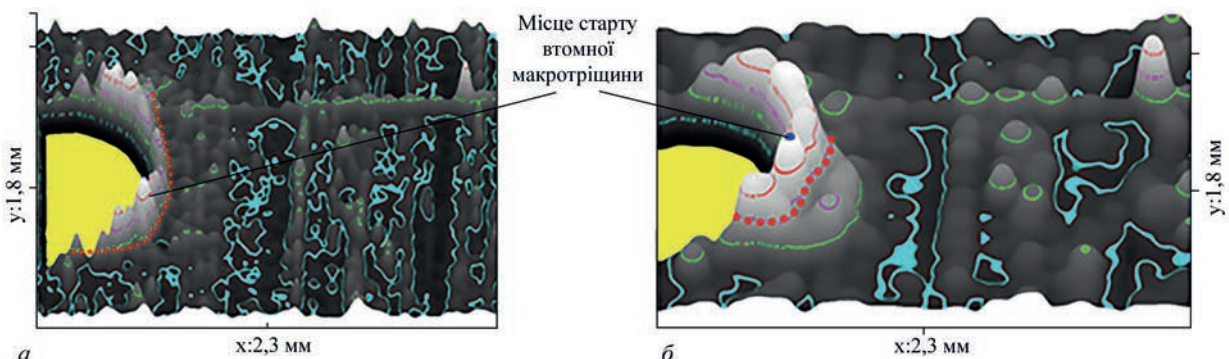


Рис. 2. Просторові розподіли середнього арифметичного значення висоти поверхні компактного зразка алюмінієвого сплаву Д16Т з круглим вирізом (діаметром 1,5 мм) на базовій площі $L_x \times L_y = 80 \times 80$ мкм після 1000 циклів (а) та після 5000 циклів (б)

де $p = 0, \dots, P-1$, $q = 0, \dots, Q-1$ – непарні номери пікселів на базовій площі $L_x \times L_y$; Δx , Δy – кроки між пікселами у двох ортогональних напрямках.

Для проведення досліджень використовували експериментальний макет 3D профілометра, побудований на базі інтерферометра Тваймана–Гріна, схема якого наведена на рис. 1.51 у праці [2]. Результати обчислення просторового розподілу S_a на ділянці відтвореного рельєфу поверхні зразка алюмінієвого сплаву Д16Т під час прикладання до нього циклічних навантажень за коефіцієнта асиметрії $R = P_{min}/P_{max} = 0,1$ та $\Delta\sigma_y(0) = 460$ МПа біля круглого отвору наведені на рис. 2.

Після $N_i = 8000$ циклів у досліджуваному зразку виникла втомна макротріщина якраз у тому місці на краю ВЗП (рис. 2), де спостерігали максимальний приріст шорсткості під час збільшення кількості циклів.

Дослідження впливу водню на рельєф поверхні зразків сталі У8. Для досліджень виготовляли пластиноподібні зразки ($50 \times 20 \times 2$ мм) зі сталі У8 (перлітна структура), поверхню яких шліфували і полірували до шорсткості $R_z = 0,060$ мкм, після чого відпалювали у вакуумі за температури $A_{c3} + 30$ °С. Зразки електролітично наводнювали за кімнатної температури в 1N розчині H_2SO_4 з домішкою 10 мг/л триоксиду арсену для інгібування реакції молізації водню на поверхні. Тривалість катодної поляризації становила 1 год, густина струму – $0,5 \dots 2,0$ А/дм², анодом слугувала платинова сітка. Для ДКР поверхні зразків використано метод трикрокової ФЗІ з ДФЗОП, який дає змогу відтворювати рельєф поверхонь з шорсткістю у межах 14–11 класів. Для досліджень використовували експериментальний макет 3D профілометра на базі інтерферометра Тваймана–Гріна [2, рис. 1.51]. За зареєстрованими інтерферограмами відтворювали рельєф поверхні на ділянці спостереження зразків до і після наводнювання. Рельєф ділянки спостереження відтворювали з розділенням 2,3 мкм.

Зі зростанням вмісту вуглецю змінюється структура металу за рахунок утворення карбідної фази, в якій водень практично нерозчинний, що знижує коефіцієнт його дифузії у 5 разів [11]. Водночас суттєво зростає площа міжзеренних та міжфазних границь перлітної структури, а також збільшується густина дислокацій для феритної структури [11]. Підвищена концентрація залишкового водню пов'язана із утворенням у структурі фериту макродефектів у вигляді блістерів, де водень накопичується і молізується. Це унеможливає його десорбцію з підповерхневих шарів. За таких самих режимів наводнювання сталь із перлітною структурою краще поглинає дифузійно-рухливий водень через збільшення площі висо-

кодефектних міжфазних границь між феритними і цементитними пластинами у перліті.

Зміни в поверхневих шарах під час десорбції відображаються на картинах відтворених рельєфів поверхні. Безпосередньо після електролітичного наводнювання зразка сталі У8 за густини струму 1 А/дм² відтворювали рельєф ділянки поверхні, наведений на рис. 3. На поверхні спостерігали формування блістерів. Упродовж 1 год після наводнювання спостерігали найбільш активний вихід водню зі зразка, утворення нових блістерів та структурні зміни у вже сформованих. Більшість блістерів мала конусоподібну форму з висотою 1,2...1,3 мкм та діаметром основи 40...80 мкм. Різницю між рельєфом ділянки поверхні, відтвореним через 1 год після наводнювання та рельєфом, відтвореним безпосередньо після наводнювання, тобто різницевий рельєф через годину після наводнювання, наведено на рис. 4.

Відомо, що за електролітичного наводнювання у приповерхневих шарах сталі У8 концентрація водню перевищує рівноважну, і він накопичується у дефектах структури [12]. Рекombінація іонів водню в молекулу супроводжується суттєвим збільшенням його об'єму і створенням всередині дефекту високого тиску газу. При цьому в підповерхневих шарах утворюються тріщини і формуються блістери (пухирці на поверхні). Під час росту тріщин і їх виходу на поверхню відбу-

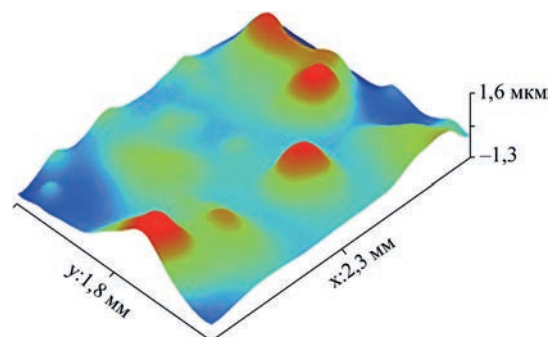


Рис. 3. Поверхня сталі У8 безпосередньо після наводнювання

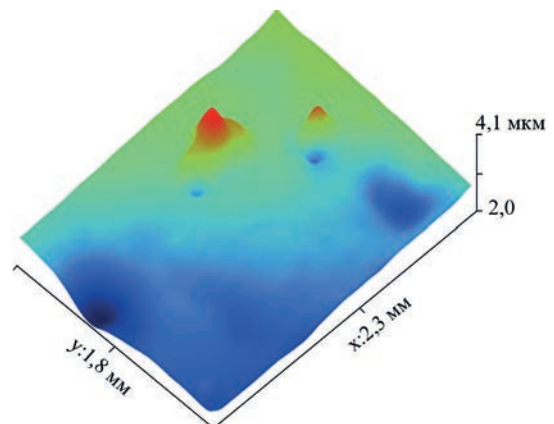


Рис. 4. Різницевий рельєф поверхні сталі У8 через 1 год після наводнювання

вається десорбція надлишкового газу, яка супроводжується зміною конфігурації та розміру блістерів. Через 2 год після наводнювання характер поверхні змінюється. Блістери збільшуються у розмірах, про що свідчить їх ріст у наведеному на рис. 5 різницевого рельєфі між відтвореними ділянками поверхні через 2 год і через 1 год після наводнювання.

Через 24 год після наводнювання висота окремих блістерів зменшилася (рис. 6), а на вершині чи боковій стороні з'явилися тріщини. Цю тенденцію наглядно показує різницевий рельєф між відтвореними ділянками поверхні через 24 год і через 2 год після наводнювання, що, очевидно, пов'язано з виведенням надлишкового молекулярного водню та інших газів із металу.

Таким чином для сталі У8 встановлено, що після насичення воднем її поверхня zdeформувалася та на ній з'явилися блістери. Під час виходу водню деформації поверхні найінтенсивніші впродовж перших двох годин після наводнювання і сильно сповільнюються через 2 тижні, а розміри блістерів збільшуються (згідно зі спостереженнями упродовж двох тижнів). Висота блістерів коли-

валася від сотень нанометрів до мікрона і більше. Після наводнювання сталі У8 спостерігали зміну рельєфу поверхні і формування блістерів, з часом форма блістерів змінювалась. Порівняння змін рельєфу сталі У8 у процесі десорбції свідчить про те, що максимальні зміни поверхні відбуваються протягом довшого періоду часу, оскільки присутність цементиту у структурі спричиняє наявність великої кількості бар'єрів для переміщення водню з підповерхневих шарів.

Висновки.

Розроблено швидкісний метод ФЗІ з ДФЗОП, який дає можливість відтворювати рельєфи наношорсткої поверхні без реєстрації розподілів інтенсивності опорного і предметного променя в інтерферометрі та без калібрування фазових зсувів опорного променя. Завдяки цьому метод можна використовувати для вивчення кінетики зміни поверхні під дією механічних навантажень або агресивних середовищ. Крім того, метод ФЗІ з ДФЗОП має можливість екстрагувати як високочастотні, так і низькочастотні складові рельєфу поверхні, включаючи 3D шорсткість і 3D хвилястість.

На основі методу ФЗІ з ДФЗОП розроблено методику встановлення найбільш імовірного місця старту втомної макротріщини, яка базується на експериментально доведеній гіпотезі про те, що максимальна шорсткість поверхні під час циклічних навантажень зразків з круглим вирізом досягається на границі ВЗП, та на критерії виявлення місця і моменту старту макротріщини за максимальним градієнтом зростання шорсткості у будь-якому пікселі відтвореного рельєфу ділянки поверхні, розташованому на границі ВЗП.

Завдяки високій швидкодії методу стали можливими дослідження впливу водню на рельєф поверхні зразків сталей. Зокрема, виконано експерименти з вивчення кінетики еволюції поверхні зразка сталі У8 після його електролітичного наводнювання. Показано, що під час виходу водню зі зразка деформації поверхні найінтенсивніші впродовж перших двох годин після наводнювання і сповільнюються через 2 тижні, а розміри блістерів збільшуються.

Список літератури / References

1. Schreiber H., Brunning J.H. (2007) Phase shifting interferometry. *Optical Shop Testing*. D. Malacara (Ed.). Hoboken, NJ, John Wiley & Sons. Chapter 14, pp. 547–666.
2. Лобанов Л.М., Муравський Л.І., Півторак В.А., Вороняк Т.І. (2017) Моніторинг напруженого стану елементів конструкцій з використанням електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Т. 3. *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій*. Довідн. пос. у 8-ми т. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, Простір-М. Lobanov, L.M., Muravsky, L.I., Pivtorak, V.A., Voronyak, T.I. (2017) Monitoring the stressed state of structural

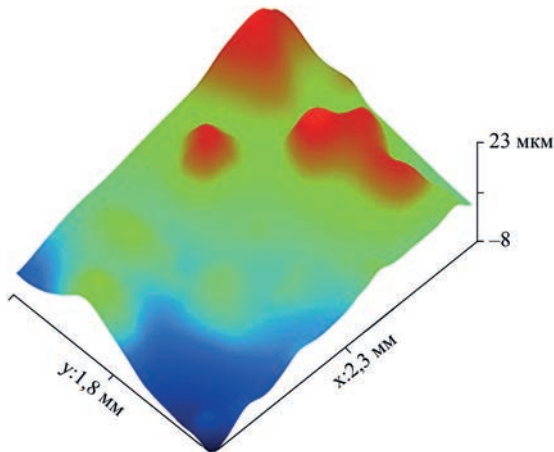


Рис. 5. Різницевий рельєф поверхні сталі У8 через 2 год після наводнювання

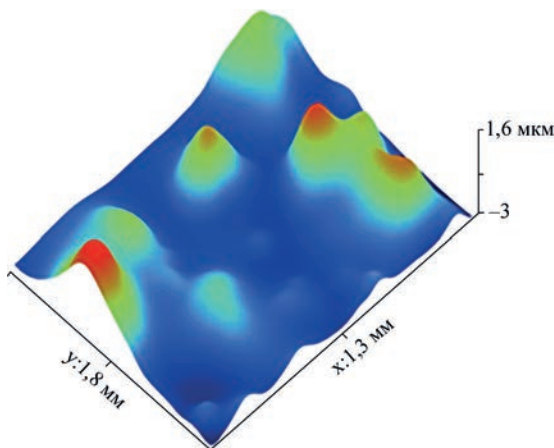


Рис. 6. Різницевий рельєф поверхні сталі У8 через 24 год після наводнювання

- elements with application of electromagnetic waves of the optical range. Vol. 3: *Technical diagnostics of materials and structures*. In: Refer. book, 8 Vol. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
3. Schmit J., Creath K., Wyant J.C. (2007) Surface profilers, multiple wavelength, and white light interferometry. *Optical Shop Testing*. D. Malacara (Ed.). Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Chapter 15, pp. 667–755.
 4. Muravsky L.I., Kmet' A.B., Stasyshyn I.V. et al. (2018) Three-step interferometric method with blind phase shifts by use of interframe correlation between interferograms. *Opt. Lasers Eng.*, 105, 27–34.
 5. Ostash O.P., Panasyuk V.V. (2001) Fatigue process zone at notches. *Int. J. Fatigue*, 23, 7, 627–636.
 6. Ostash O.P. (2006) New approaches in fatigue fracture mechanics. *Materials Science*, 42, 1, 5–19.
 7. Muravsky L.I., Picart P., Kmet' A.B. et al. (2016) Evaluation of fatigue process zone dimensions in notched specimens by two-step phase shifting interferometry technique. *Opt. Eng.*, 55, 10, 104108 – 1–9.
 8. Arola D., Williams C.L. (2002) Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces. *Int. J. Fatigue*, 24, 9, 923–930.
 9. Suraratchai M., Limido J., Marbu C., Chieragatti R. (2008) Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy. *Ibid*, 30, 12, 2119–2126.
 10. Chan K.S., Tian J.W., Yang B., Liaw P.K. (2009) Evolution of slip morphology and fatigue crack initiation in surface grains of Ni200. *Metall. Mater. Trans. A*, 40, 11, 2545–2556.
 11. Mitsushima S., Takakuwa Y., Nagasava K. et al. (2016) Membrane electrolysis of toluene hydrogenation with water decomposition for energy carrier synthesis. *Electrocatalysis*, 7, 2, 127–131.
 12. Kanezaki T., Narazaki C., Mine Y. et al. (2008) Effects of hydrogen on fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels. *Int. J. Hydrog. Energy*, 33, 10, 2604–2619.

НОВЫЙ МЕТОД И СРЕДСТВА ФАЗОСДВИГАЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭВОЛЮЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.И. Муравский, Т.И. Вороняк, И.В. Стасишин

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.

E-mail: murav@ipm.lviv.ua

Разработан скоростной метод тришаговой фазосдвигающей интерферометрии с произвольными фазовыми сдвигами опорного луча, имеющий ряд преимуществ по сравнению с известными подобными методами фазосдвигающей интерферометрии и, в первую очередь, не требует прецизионной калибровки фазосдвигающего устройства и дополнительной регистрации опорного и предметного лучей в интерферометре, а также обеспечивает плавный сдвиг фазы опорного луча. На основании метода тришаговой фазосдвигающей интерферометрии создан экспериментальный макет 3D профилометра, на котором апробированы новые методики воспроизведения рельефа поверхности, экстрагирования 3D шероховатости и волнистости, установления наиболее вероятного места старта усталостной макротрещины в образцах алюминиевого сплава D16T с вырезами при циклических нагрузках и мониторинга эволюции поверхности образцов стали У8 после гидрогенизации. В частности, показано, что макротрещина с наибольшей вероятностью стартует на границе усталостной зоны предразрушения с того места, где происходит наибольшее приращение шероховатости поверхности при усталостных нагрузках. При исследовании влияния водорода на рельеф поверхности образцов стали У8 установлено, что после насыщения водородом ее поверхность деформируется и на ней появляются блистеры. При выходе водорода из материала деформационные изменения продолжают, причем наиболее интенсивные происходят в течение первых двух часов после гидрогенизации, и существенно замедляются через две недели, а блистеры увеличиваются в размерах и изменяют форму. Бибиогр. 12, рис. 6.

Ключевые слова: фазосдвигающая интерферометрия, опорный луч, шероховатость поверхности, усталостная макротрещина, блистеры

NEW METHOD AND MEANS OF PHASE SHIFTING INTERFEROMETRY FOR REPRODUCTION AND CONTROL OF STRUCTURAL MATERIAL SURFACE EVOLUTION

L.I. Muravsky, T.I. Voronyak, I.V. Stasyshyn

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: murav@ipm.lviv.ua

A fast method of three-step phase shifting interferometry with arbitrary phase shifts of the reference beam was developed. This method has a number of advantages, compared to similar methods of phase shifting interferometry, and, first of all, it does not require precise calibration of the phase-shifting device or additional recording of the reference and object beams in the interferometer, and also ensures a smooth shifting of reference beam phase. The method of three-step phase shifting interferometry was the base to create an experimental model of 3D profile meter. It was used to test new procedures of reproducing the surface relief, extraction of 3D roughness and waviness, establishing the most probable point of initiation of a fatigue microcrack in notched samples of aluminium alloy D16T under cyclic loading and monitoring the evolution of the surface of U8 steel samples after hydrogenation. It is shown, in particular, that the microcrack starts with the highest probability on the boundary of the fatigue zone of prefracture from the site, where the greatest increment of surface roughness occurs during fatigue loading. When studying the influence of hydrogen on the relief of U8 steel samples, it was found that during saturation with hydrogen its surface is deformed and develops blisters. When hydrogen escapes from the material, the deformational changes of the surface go on, the most intensive of them occurring during the first two hours after hydrogenation, and essentially slow down after two weeks, while blisters increase in size and change their shape. 12 Ref., 6 Fig.

Keywords: phase shifting interferometry, reference beams, surface roughness, fatigue macrocrack, blisters

Надійшла до редакції
19.02.2019

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В.Л. Алексенко¹, А.А. Шарко², А.В. Шарко¹, Д.М. Степанчиков², К.Ю. Юренин¹

¹Херсонская государственная морская академия. 73000, г. Херсон, просп. Ушакова, 20. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

²Херсонский национальный технический университет. 73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24. E-mail: kntu@kntu.net.ua

Приводятся результаты исследования и методика обработки спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии при испытаниях образцов из стали СтЗсп на четырехточечный изгиб с целью оценки возможности их использования для решения задач диагностики. Выявлены существенные различия в изменениях спектральных характеристик и моментах возникновения сигналов акустической эмиссии при различных стадиях нагружения образцов. Обнаружен упреждающий эффект фиксации дискретных изменений структуры материала методом акустической эмиссии при изгибе. Библиогр. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, сталь, четырехточечный изгиб, деформация

Структурное состояние материала при прочих равных условиях может оказаться важным фактором, влияющим на его свойства и долговечность. Одним из методов наблюдения за изменениями внутренней структуры материала при его деформировании является метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации и обработке волн напряжений, возникающих в результате формирования и разрушения структур материалов. Одним из наиболее востребованных направлений применения метода АЭ является проведение испытаний с целью диагностики структурной целостности промышленных объектов, позволяющее осуществлять непрерывный эксплуатационный контроль.

Прогнозирование структурных состояний материалов на основе установления связи между эволюцией дефектной структуры и кинетикой накопления повреждений, регистрируемых методом АЭ, на разных стадиях деформирования материалов представляет не только научную, но и техническую задачу.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что корреляцию информативных параметров АЭ с развитием дефектов определяют экспериментальным путем для каждого конкретного материала [1–6]. Наиболее сложным этапом в изучении и исследовании структурных особенностей механизмов деформирования методом акустической эмиссии является регистрация и интерпретация АЭ сигналов [7–9]. Хотя к настоящему времени имеется обширная информация об исследовании кинетических особенностей и закономерностях деформации конструкционных материалов, но глубокое понима-

ние природы, происходящих при этом процессов, все еще не достигнуто.

Целью работы является изучение характеристик акустико-эмиссионных сигналов при двух видах деформации структуры – простом сжатии и сжатии с изгибом.

Для эксперимента была выбрана одна из распространенных конструкционных углеродистых сталей СтЗсп. Образцы для испытаний на четырехточечный изгиб вырезались из листового проката размером 300×20×4 мм. Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования по данным АЭ осуществлялась при деформации образцов на четырехточечный изгиб на установке, сконструированной на базе машины для испытания пружин МИП-10, работающей по принципу заданного деформирования. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

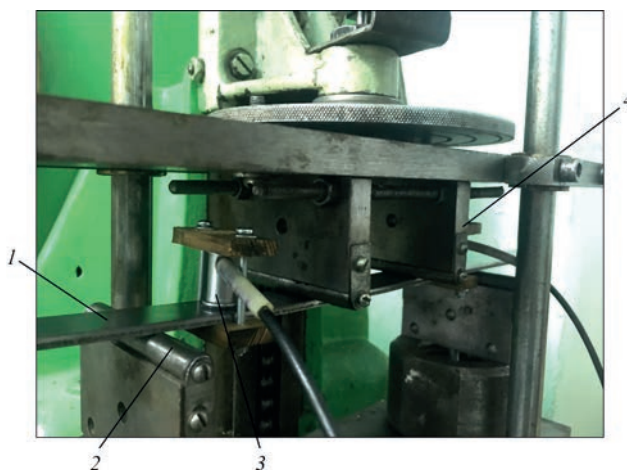


Рис. 1. Экспериментальная реализация четырехточечного изгиба на базе установки МИП-10: 1 – исследуемый образец; 2 – опора; 3 – датчик АЭ; 4 – индентор нагружающего устройства

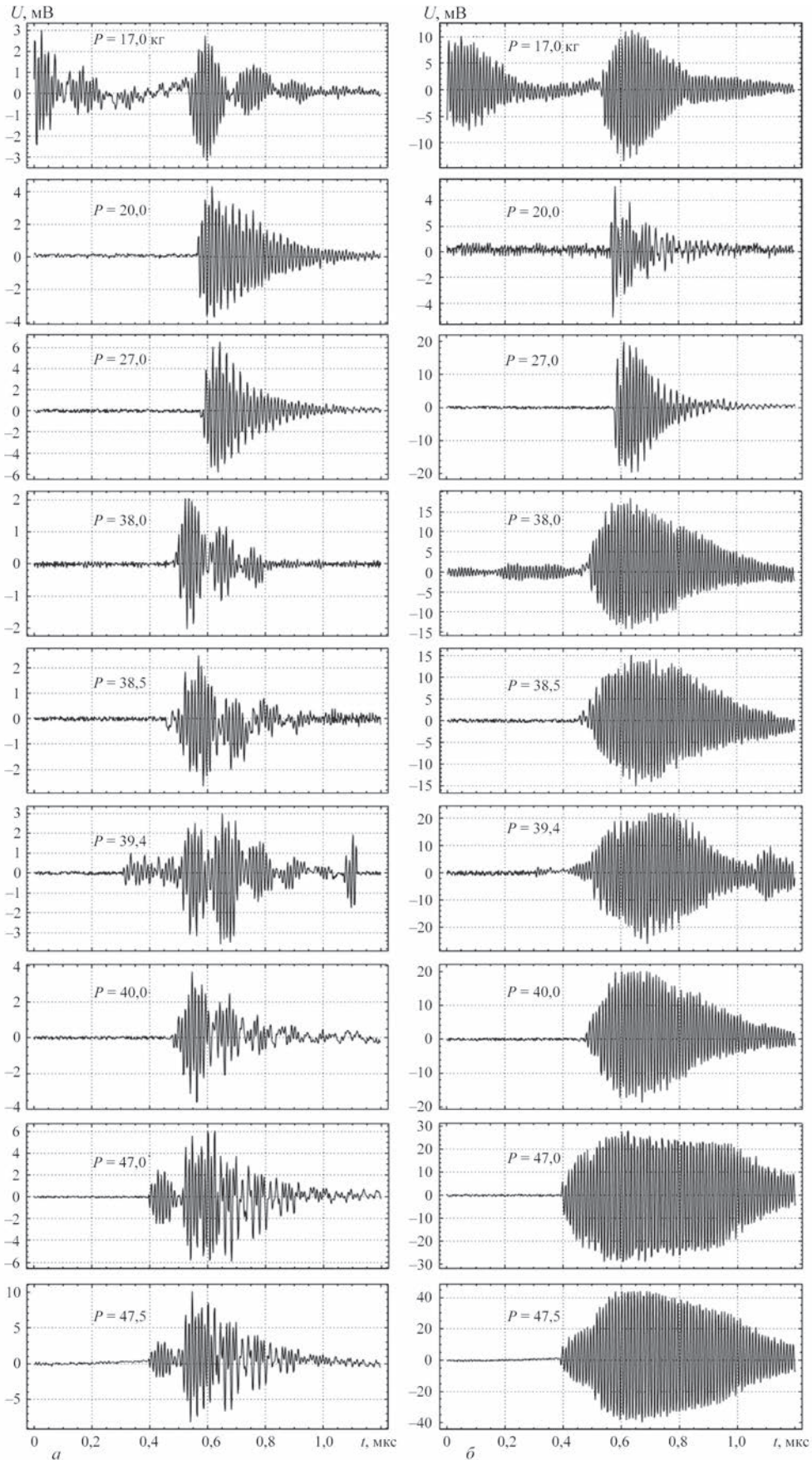


Рис. 2. Сигналы АЭ при разных нагрузках: a – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; b – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Конструктивно установка содержит два основных механизма: механизм деформирования и механизм силоизмерителя. Механизм деформирования включает: двигатель, червячный редуктор, нагружающий винт, каретку с верхней тарелью и винтом отключения компенсационной пружины. На тарели закреплен нониус. Механизм силоизмерителя включает: нижнюю тарель и передаточный механизм рычажного типа, расположенный внутри корпуса. Для реализации четырехточечного изгиба в установке дополнительно были установ-

лены пуансоны в виде индентора нагружающего устройства и опоры. Опоры закреплялись неподвижно, чтобы позволять точно центрировать образец. При этом продольная ось образца располагалась параллельно боковой поверхности траверсы, а центр симметрии образца совпадал с осью приложенной нагрузки. Крепление датчиков АЭ к образцу осуществлялось с помощью струбцин. Испытания проводились с регистрацией нагрузки и соответствующего прогиба образца с одновременной фиксацией моментов возникновения сигналов АЭ.

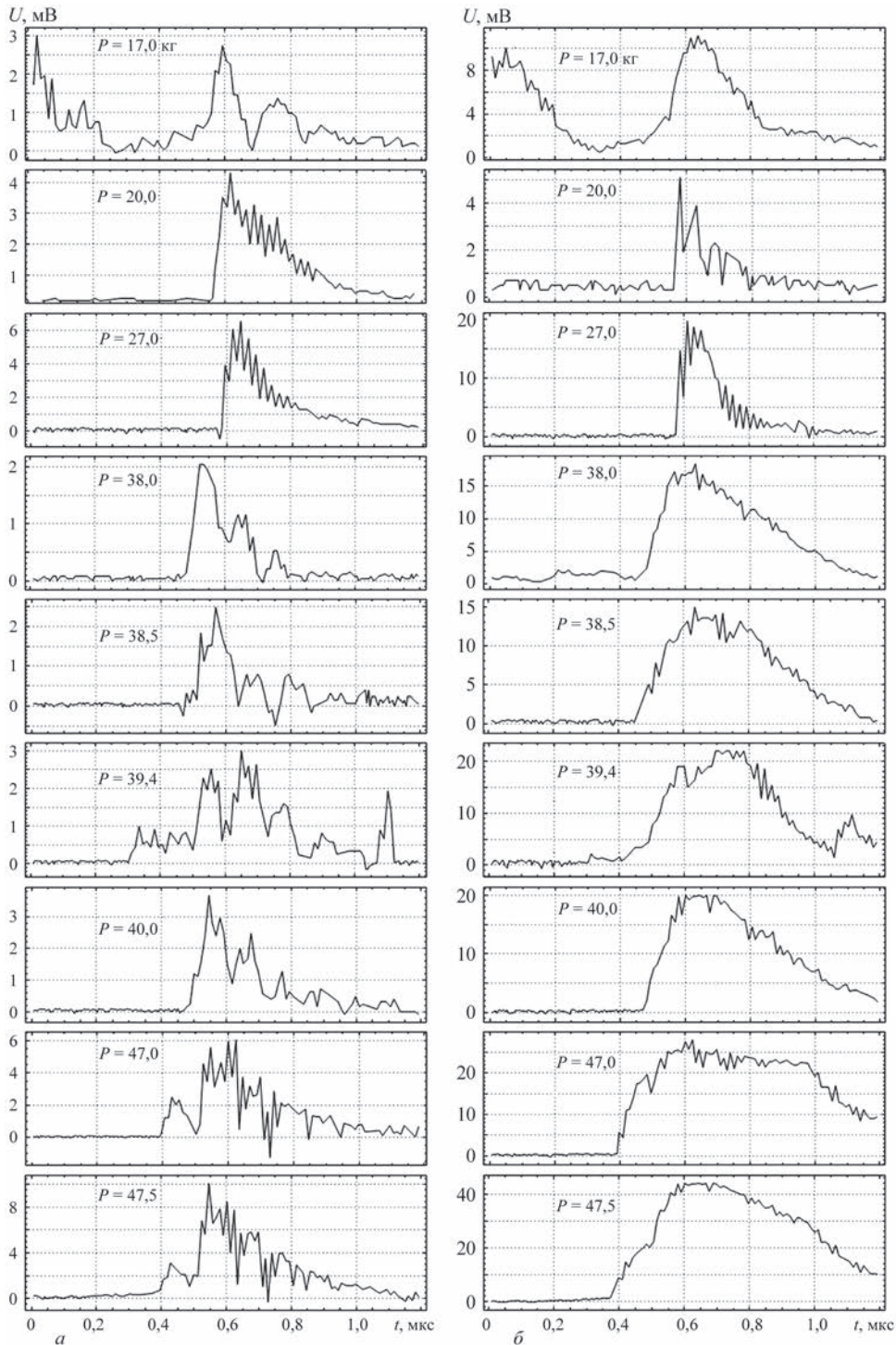


Рис. 3. Огибающая сигналов АЭ при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

В качестве контактного материала между преобразователями АЭ и образцом использовалось трансформаторное масло. В измерительной установке использовались широкополосные датчики к АЭ прибору АФ15 с полосой пропускания 0,2...0,5 и 0,2...2,0 МГц. Используемая в эксперименте информационно-измерительная система обеспечивала индикацию, регистрацию и предобработку сигналов АЭ с дальнейшим ее сохранением в памяти компьютера с помощью запоминающего осциллографа (RIGOL DS1052E Digital oscilloscope). Результаты АЭ измерений для обоих датчиков с одновременной фиксацией нагрузки и прогиба образца представлены на рис. 2.

Для датчика с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц обнаружен монотонный рост амплитуд АЭ сигналов в пределах участков деформационного упрочнения [10]: зона упругой деформации соответствующая значениям нагрузок $P = 17; 20; 27$ кг, зона пластической деформации, соответствующая нагрузкам 38; 38,5; 39,4; 40 кг и зона достижения предела текучести $P = 47; 47,5$ кг. Для датчика с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц в зонах упругой и пластической деформаций наблюдаются некоторые колебания максимальных амплитуд сигналов АЭ, хотя общая тенденция их возрастания с увеличением нагрузки также прослеживается.

В характере представленных АЭ сигналов можно выделить высокочастотную составляющую, связанную с осцилляциями, т. е. заполнением электрическим сигналом и низкочастотную, харак-

теризующую огибающую сигнала АЭ. Поскольку огибающая АЭ сигнала непосредственно связана с его энергетическим спектром, результаты экспериментальных исследований моментов возникновения сигналов АЭ при различных нагрузках представлены в виде такой информативной характеристики, как огибающая сигнала АЭ (рис. 3), содержащая характерные для данного сигнала локальные экстремумы. Как правило, под огибающей сигнала АЭ понимается его верхняя часть, которая строится по локальным максимумам. В массив значений огибающей сигнала АЭ записываются последовательно значения всех точек, для которых выполняется условие локального максимума в окрестности трех последовательных точек U_{i-1}, U_i, U_{i+1} , выбранных из массива значений $U_i = U(t_i)$:

$$(U_{i-1} < U_i) \wedge (U_i > U_{i+1}),$$

где U_i – электрическое напряжение, определяемое дискретными показаниями осциллографа. Размерность этого массива будет меньше размерности массива значений сигнала U_i , так как в массив значений огибающей записываются только локальные максимумы. Для формирования массива значений огибающей во всех равноотстоящих точках отсчета времени t_i используется линейная интерполяция. При линейной интерполяции огибающей между двумя соседними максимумами $U_1 = U(t_1)$ и $U_2 = U(t_2)$ используется формула:

$$U(t) = U_1 + \frac{(U_2 - U_1)(t - t_1)}{t_2 - t_1},$$

Таблица 1. Зоны возникновения АЭ сигналов и экспериментальные значения основных характеристик при четырехточечном изгибе образцов из стали СтЗсп

Зоны возникновения АЭ сигналов	Механические характеристики			Характеристики АЭ эффектов*)		
	Нагрузка P , кг	Прогиб Δl , мм	Напряжение σ , МПа	Пиковые амплитуды U_{max} , 10^{-3} В	Площадь под огибающей S , 10^{-10} В·с	Плотность сигналов N , 10^8 с $^{-1}$
I	17	6,511	93,80	3,18	3,09	1,39
				13,40	48,86	1,68
	20	6,815	110,36	4,32	5,06	1,02
				5,10	9,45	2,00
	27	8,011	148,99	6,56	6,03	1,37
				19,80	29,33	1,23
II	38	14,011	209,69	2,05	7,26	1,92
				18,40	69,85	1,72
	38,5	14,312	212,45	2,64	7,45	1,88
				15,00	56,90	1,24
	39,4	14,823	217,41	3,56	10,81	1,86
				26,00	91,34	1,68
40	15,418	218,72	3,68	8,99	1,54	
			20,05	81,38	1,31	
III	47	23,901	234,52	6,08	17,72	1,66
				28,92	157,09	2,08
	47,5	24,030	235,27	10,10	21,68	1,73
				44,00	237,34	1,59

*) Для каждой нагрузки первая строка цифр – для датчика с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; вторая – для датчика с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц.

где U_1, U_2 – значения огибающей в моменты времени t_1 и t_2 , соответственно, $t_1 < t < t_2$.

Для вычисления площади под огибающей использован метод численного интегрирования – метод трапеций:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{U_i + U_{i+1}}{2} \Delta t,$$

где Δt – шаг дискретизации; n – количество значений в массиве.

Для осциллографа RIGOL DS1052E Digital oscilloscope являющегося частью АЭ системы, шаг дискретизации равен $0,02 \cdot 10^{-7}$ с. Количество значений в массиве равно 600.

Также определены пиковые амплитуды U_{max} и плотности АЭ сигналов N . Пиковые амплитуды соответствуют абсолютному максимуму сигнала АЭ. Плотность сигнала АЭ определялась путем подсчета количества пересечений порогового уровня сигнала, деленного на время наблюдения сигнала. Пороговый уровень принимался равным

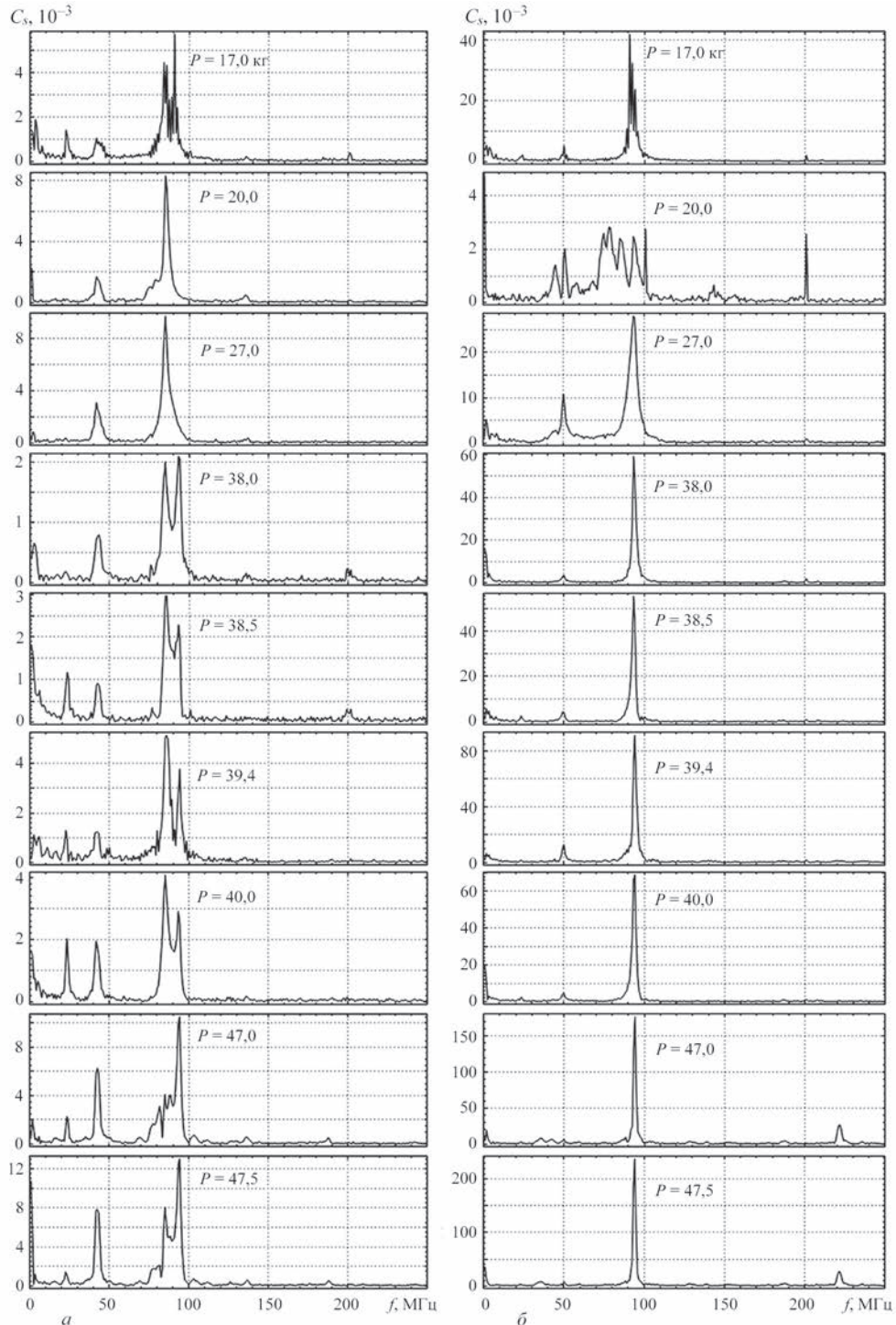


Рис. 4. Преобразования Фурье АЭ сигналов при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

$0,05U_{max}$ для каждого сигнала. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Обнаружено наличие трех зон возникновения АЭ сигналов, первая из которых соответствует линейному участку диаграммы, где выполняется закон Гука, вторая группа – отклонению от линейной зависимости, наступлению предела пропорциональности и третья – достижению предела текучести материала (табл. 1). Отмечен рост пиковых амплитуд и площадей под огибающей АЭ сигнала в пределах каждой зоны возникновения АЭ сигналов. Плотность АЭ сигналов преимущественно демонстрирует тенденцию к уменьшению в направлении от начала к концу каждой зоны. Между зонами отличия в значениях плотности АЭ сигналов незначительные.

Спектральные методики обработки сигналов АЭ с помощью Фурье преобразований позволяют охарактеризовать сигнал одновременно в амплитудно-временном и амплитудно-частотном взаимно обратных пространствах. Когда исходная функция является функцией времени и представляет физический сигнал, преобразование Фурье имеет стандартную интерпретацию как спектр сигнала. Абсолютная величина получающейся в результате комплексной функции представляет амплитуды соответствующих частот (рис. 4).

Анализ рис. 4 показал явное увеличение амплитуд преобразования Фурье с ростом нагрузки на образец внутри участков деформационного упрочнения и изменение очертания сигналов, характеризующих их гармонические составляющие. Следует отметить что, несмотря на общий характер изменения параметров АЭ сигналов для обоих датчиков, масштаб оси ординат отличается, что свидетельствует о большей чувствительности второго датчика, верхняя граница частотного диапазона которого лежит в области более высоких частот. Это положение находится в соответствии с тем, что амплитуда и частота отфильтрованного датчиком сигнала АЭ зависит от амплитудно-частотной характеристики датчика [11]. Если регистрация АЭ проводится преобразователем с узкой полосой пропускания, которой обладает датчик более высокой чувствительности, то частота АЭ сигнала определяется главным образом частотой преобразователя, что объясняет наличие пика амплитудных преобразований Фурье, соответствующих основной частоте.

При использования явления АЭ для неразрушающего контроля необходимо установить набор параметров АЭ, несущих информацию о различных сторонах контролируемого процесса и выбрать из них наиболее оптимальные. Результаты такого исследования представлены в табл. 2.

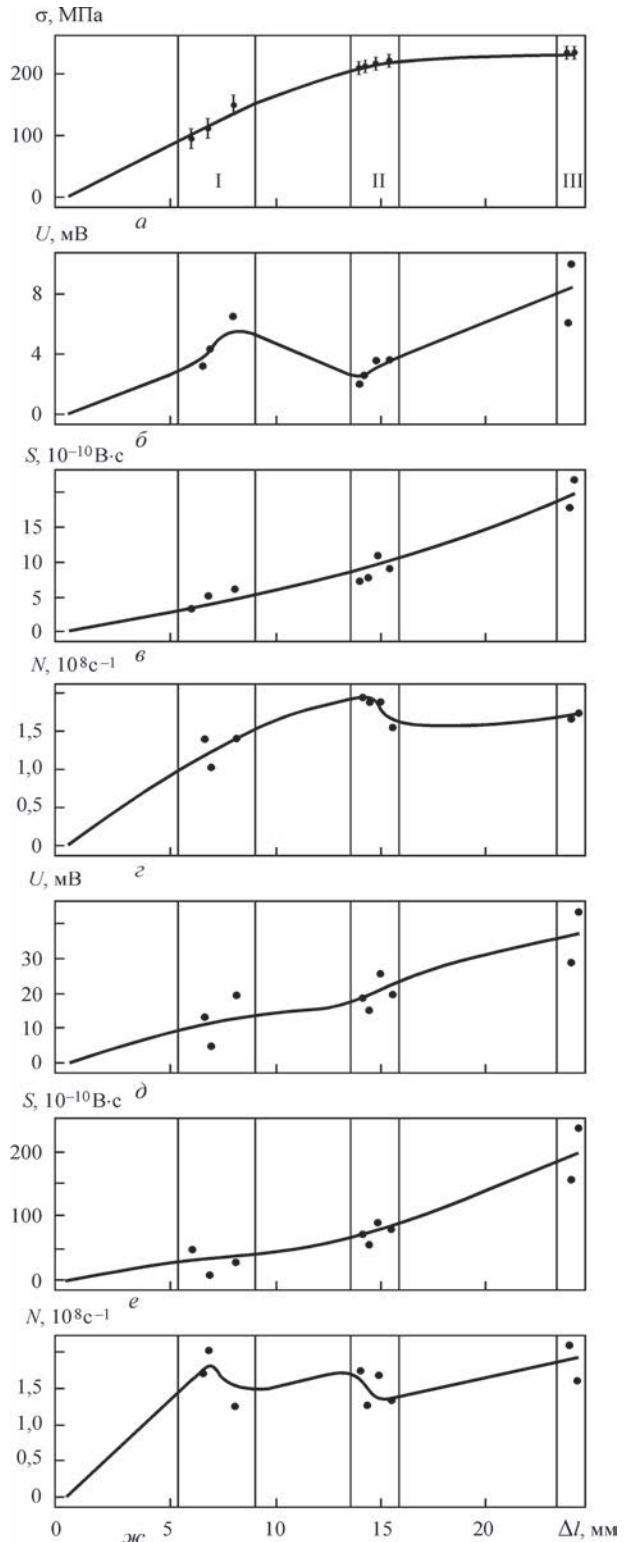


Рис. 5. Результаты комплексных измерений механического напряжения и моментов возникновения АЭ сигналов (а), пиковых амплитуд (б, д), площадей под огибающей АЭ сигналов (в, е) и плотности АЭ сигналов (г, ж); б-г – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; д-ж – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Для получения общих выводов из представленной информации результаты измерений отображены в виде зависимостей механического напряжения от прогиба $\sigma = f(\Delta l)$

Таблица 2. Информационные параметры АЭ сигналов, рекомендуемые к использованию при четырехточечном изгибе образцов из стали СтЗсп

Параметры АЭ сигнала	Критерии	Операции	Характер проявления	Пригодность
Пиковая амплитуда	Абсолютная величина	Сравнение с предшественником	Рост на характерных участках деформационного упрочнения	+
Амплитудно-временное распределение	Плотность распределения амплитуд во времени	Визуальное сопровождение	Изменение характера сигнала	± Неоднозначность результатов
Амплитудно-частотное распределение	Частотный диапазон	Преобразование Фурье	Изменение частотного образа сигнала	± Нечеткость зависимости от нагрузки
Энергетический спектр	Форма огибающей АЭ сигнала	Линейная интерполяция	Осцилляции локальных экстремумов	+
Плотность сигналов	Анализ отклонений	Сравнение с предшественником	Заполняемость огибающей энергетического спектра	± Качественные оценки

(рис. 5, а) и основных рассмотренных характеристик АЭ сигналов – пиковых амплитуд, площади под огибающей и плотности АЭ сигналов – от прогиба (рис. 5, б–ж), на которых точками обозначены моменты возникновения АЭ сигналов.

Сравнение диапазонов моментов возникновения сигналов АЭ с табличными значениями деформационных характеристик [10] показало, что фиксация деформационных переходов методами АЭ наступает раньше, чем это следует из механических испытаний.

Завершение зоны упругой деформации при четырехточечном изгибе, характеризуемое значением 150 МПа, по данным АЭ измерений приходится на значение 148,99 МПа, наступление предела пропорциональности $\sigma = 220$ МПа по данным АЭ измерений происходит при значениях 218,72 МПа, достижение предела текучести равного 240 МПа по данным АЭ измерений приходится на значение $\sigma = 235,27$ МПа. Тем самым показано, что метод АЭ позволяет зафиксировать наступление характерных точек деформационного процесса ранее, чем это следует из механических испытаний, что может быть использовано при диагностике и прогнозировании эксплуатационных свойств материалов.

Выводы

В процессе возрастающего силового воздействия с повышением внутренних напряжений происходит локальная динамическая перестройка материала, сопровождающаяся АЭ.

Обнаружен дискретный характер возникновения акустической эмиссии при четырехточечном изгибе стали СтЗсп. В зоне перехода от участка деформирования при упругом сжатии к изгибу наблюдается четкое изменение параметров АЭ.

Наблюдаемые закономерности изменения сигналов АЭ отражают различный вклад процессов деформации в формирование источников АЭ. Установлено взаимно однозначное соответствие между спектральными характеристиками дискретной структуры материалов и характеристиками распространения АЭ сигналов.

Накопление повреждений в нагруженных материалах и их регистрация с помощью АЭ открывает широкие перспективы для неразрушающего контроля и диагностики материалов и изделий, дает возможность проследить динамику развития дефектов и обеспечить прогнозирование эксплуатационных характеристик материалов.

Список литературы

1. Hase A., Wada M., Koga T., Michina H. (2014) The relationship between acoustic emission via piezoelectric actuator wave control. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **70**, 947–955.
2. Srickij V., Bogdevicius M., Junevicius R. (2016) Diagnostic features for the condition monitoring of hypoid gear utilizing the wavelet transform. *Applied Acoustics*, **106**, 51–62.
3. Kumar J., Sarmah R., Ananthakrishna G. (2015) General framework for acoustic emission during plastic deformation. *Physical Review*, **92**, 1441.
4. Li C., Sanchez R.V., Zurita G. et al. (2016) Gearbox fault diagnosis based on deep random forest fusion of acoustic and vibratory signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **76/77**, 283–293.
5. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Юренин К.Ю. и др. (2017) Влияние степени деформации на параметры сигналов акустической эмиссии стали СтЗсп. *Науковi нотатки. Міжвузівський збірник*. Луцьк, **60**, сс. 8–21.
6. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Сметанкин С.А. и др. (2017) Обнаружение акустико-эмиссионных эффектов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 25–31.
7. Марасанов В.В., Шарко А.А. (2017) Энергетический спектр сигналов акустической эмиссии в сложных средах. *Журнал нано- та електронної фізики*, **2**, **4**, 04024-204024-5.
8. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. (2010) Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава АМг6. *ФТТ*, **52**, **11**, 2223–2231.

9. Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н. (2001) Акустическая эмиссия при деформации пористого железа. *ПЖТФ*, 27, 22, 14–18.
10. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. (1988) *Справочник по сопротивлению материала*. Киев, Наукова думка.
11. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2017) Влияние характеристик АЭ датчика на регистрируемые спектры волн. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 3–6.
5. Aleksenko, V.L., Sharko, A.A., Yurenin, K.Yu. et al. (2017) Influence of the degree of strain on AE signal parameters of St3sp steel. *Scientific notes. Interuniversity collection. Lutsk*, 60, 8-21 [in Russian].
6. Aleksenko, V.L., Sharko, A.A., Smetankin, S.A. et al. (2017) Detection of acoustic-emission effects during reloading of St3sp steel specimens. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 25–31 [in Russian].
7. Marasanov, V.V., Sharko, A.A. (2017) Energy spectrum of AE signals in complex media. *Zh. Nano- ta Elektronnoi Fizyky*, 2(4), 04024-204024-5 [in Russian].
8. Shibkov, A.A., Zolotov, A.E., Zheltov, M.A. (2010) Acoustic precursor of unstable plastic deformation of aluminium-magnesium alloy AMg6. *FTT*, 52(11), 2223–2231 [in Russian].
9. Polyakov, V.V., Egorov, A.V., Svistun, I.N. (2001) Acoustic emission at deformation of porous iron. *PZhTF*, 27(22), 14–18 [in Russian].
10. Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P., Matveev, V.V. (1988) *Reference book on the strength of materials*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
11. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2017) Effect of characteristics of AE transducer on registered wave spectra. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 3-6 [in Russian].

References

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕХАНІЗМІВ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ВИГІНІ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В.Л. Алексенко¹, А.А. Шарко², А.В. Шарко¹, Д.М. Степанчиков², К.Ю. Юренін¹

¹Херсонська державна морська академія. 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

²Херсонський національний технічний університет. 73008, м. Херсон, Бериславське шосе, 24. E-mail: kntu@kntu.net.ua

Наведено результати дослідження і методика обробки спектральних характеристик сигналів акустичної емісії при випробуваннях зразків зі сталі Ст3сп на чотирьохточковий вигин з метою оцінки можливості їх використання для вирішення завдань діагностики. Виявлено суттєві відмінності в змінах спектральних характеристик і моменти виникнення сигналів акустичної емісії при різних стадіях навантаження зразків. Виявлено попереджуючий ефект фіксації дискретних змін структури матеріалу методом акустичної емісії при вигині. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: акустична емісія, сталь, чотирьохточковий вигин, деформація

IDENTIFICATION BY AE METHOD OF STRUCTURAL FEATURES OF DEFORMATION MECHANISMS AT BENDING

V.L. Aleksenko¹, A.A. Sharko², A.V. Sharko¹, D.M. Stepanchikov², K.Yu. Yurenin¹

¹Kherson State Maritime Academy. 20 Ushakov Prosp., 73000, Kherson. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

²Kherson National Technical University. 24 Berislav Rd., 73008, Kherson. E-mail: kntu@kntu.net.ua

The paper gives the results of investigation and procedure of processing the spectral characteristics of acoustic emission signals at testing samples from St3sp(killed) steel by four-point bending, in order to assess the possibility of their application to solve diagnostics problems. Essential differences have been found in the changes of spectral characteristics and moments of emergence of acoustic emission signals at different stages of sample loading. The preemptive effect of recording the discrete changes in the material structure by acoustic emission method at bending was established. 11 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

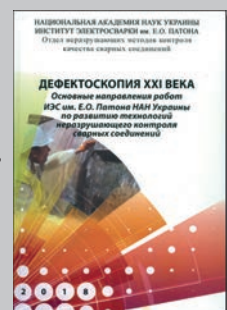
Keywords: acoustic emission, steel, four-point bending, deformation

Поступила в редакцію
10.02.2019

Новая книга

Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по развитию технологий неразрушающего контроля сварных соединений / Под ред. проф. В.А. Троицкого. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2018. – 196 с.

Сборник содержит 11 ранее опубликованных статей сотрудников отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений ИЭС им. Е.О. Патона, а также рекламные материалы различных методов неразрушающего контроля.



НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕТВОРЮВАНОВОГО ОБ'ЄМУ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ МЕТОДОМ ШИРОГРАФІЇ

Л.М. Лобанов, В.А. Півторак, І.В. Киянець, В.В. Савицький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

За результатами експериментальних досліджень, проведених методом електронної ширографії, розроблено технології неруйнівного контролю якості та виявлення зон втрати стійкості елементів і вузлів тонкостінних конструкцій перетворюваного об'єму космічного призначення при навантаженні їх внутрішнім тиском, термічним, механічним та комбінованим способами. Ефективність застосування запропонованих технологій була підтверджена при проведенні експериментів з діагностики натурних як розгорнутих конусних елементів конструкцій перетворюваного об'єму, так і нерозгорнутих у вигляді гофрованих дисків. Бібліогр. 6, рис. 8.

Ключові слова: конструкції перетворюваного об'єму, неруйнівний контроль якості, електронна ширографія

В аерокосмічній промисловості конструкції перетворюваного об'єму (КПО) є активно досліджуваною областю космічних технологій, що дозволяють спростити доставку необхідного вантажу на навколоземну орбіту. У переважній більшості космічні КПО являють собою оболонки з еластичних м'яких матеріалів, здатні піддаватися багаторазовим неруйнівним згинанням. Відповідно, головну увагу розробників техніки даного типу сфокусовано на забезпеченні жорсткості оболонки та її стійкості після розкриття за допомогою різноманітних методів, що мають обмежену ефективність.

Окремим класом конструкцій, що трансформуються, є КПО з металевою оболонкою, в яких використання геометричних закономірностей згинання поверхонь дозволяє реалізувати об'ємне деформування, порівняне з вигинанням м'яких матеріалів. Такий тип КПО є оригінальною розробкою ІЕЗ ім. Є.О. Патона і не має близьких аналогів. Технологія формування вихідних гофрованих дисків, що використовується, дозволяє виготовляти оболонкові конструкції з широко розповсюджених матеріалів і отримувати після трансформації якісні герметичні вироби [1–3].

Підвищення надійності та довговічності роботи таких конструкцій обумовлено вдосконаленням методів неруйнівного контролю якості зварних з'єднань та просторової конструкції в цілому.

Широкі можливості для неруйнівного контролю якості КПО надають методи лазерної інтерферометрії – цифрової голографії, електронних спекл-інтерферометрії та ширографії [4–6]. Найперспективніший з них – метод електронної ширографії, що має такі суттєві переваги: наочність,

безконтактність, нечутливість до впливу вібрацій на об'єкт дослідження, діагностика у реальному масштабі часу об'єктів складної форми і значних розмірів, отримання даних про деформацію поверхні контрольованих об'єктів.

Ширографія ефективна для неруйнівного контролю якості, коли дефект у контрольованій ділянці об'єкта викликає аномальну деформацію його поверхні, спричинену навантаженням (нагріванням, розтягуванням, стисканням тощо). Ця аномалія виявляється внаслідок локальної зміни інтерференційної картини смуг і характеризується кривою розподілу похідної від переміщень в площині об'єкта (u, v) або позаплощинних переміщень (w) по напрямку x або y (визначається широзсувом) уздовж обраних перерізів. При цьому екстремуми, які виникають на кривій зміни похідної, вказують на присутність дефектів на контрольованій ділянці об'єкта.

Важливою перевагою електронної ширографії є те, що на відміну від традиційних методів, які вказують тільки на наявність або відсутність дефекта, вона дає можливість візуалізувати концентрацію напружень, яка обумовлена дефектом або конструктивними особливостями об'єкта дослідження. Метод електронної ширографії надає також можливість оперативно контролювати об'єкти значних розмірів, що визначається потужністю лазера (більша потужність, більшу площу можна освітити).

Метод ширографії не потребує особливого захисту від вібрацій, оскільки в ньому реєструються похідні від переміщень, він не чутливий також до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації. При контролі

якості методом електронної ширографії поверхню об'єкту, що контролюється, повністю або частково освітлюють когерентним лазерним випромінюванням. Розсіяне дифузною поверхнею об'єкту світло, створюючи спекл-структуру, попадає на широеlement та фокусується в площині зображень цифрової камери. На матриці камери формується пара зміщених в напрямку широзсуву зображень точок об'єкту. Величина та напрямок зміщення зображень точок на матриці камери визначається параметрами широеlementу [5].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено КПО, які призначені для використання у випадках, коли потрібно полегшити їх доставку та монтаж на місці експлуатації завдяки скороченню поздовжнього розміру. Після виготовлення розмір такої конструкції у складеному стані може бути меншим за робочий у десять разів. Монтаж полягає у встановленні конструкції на місце використання та перетворенні поздовжнього розміру до робочого значення подаванням у внутрішню порожнину надлишкового тиску величиною близько 1,0...1,2 атм.

Ефект формозміни забезпечується тим, що корпус конструкції збирають із необхідної кількості перетворюваних елементів, що являють собою гофровані диски. Одна пара дисків, що з'єднані між собою уздовж кільцевих шпангоутів великого діаметру, дозволяє отримати односекційну КПО. При використанні двох або більшої кількості пар дисків можливо виготовити багатосекційну конструкцію. Диски зварюють між собою через кільцеві шпангоути по великим і малим діаметрам.

Гофровані диски отримують із тонколистової замкненої зрізаної конічної оболонки ротаційним формоутворенням кільцевих гофрів у спеціальній формі, починаючи від малого діаметру конуса до більшого. Гофрований диск може бути знову перетворений у конічну оболонку. Схеми контрольованих сталевих і титанових конусних елементів наведено на рис. 1.

Проведені експерименти на тестових зразках конічних елементів (рис. 1) зі сталі 12Х18Н10Т розмірами $\varnothing 222 \times \varnothing 122 \times 107$ мм, 6 гофрів (а); $\varnothing 414 \times \varnothing 248 \times 148,5$ мм, 15 гофрів (б) і титанового сплаву ВТ1-0 розмірами $\varnothing 600 \times \varnothing 246 \times 379$ мм, 38 гофрів (в), всі з товщиною стінки 0,2 мм, із попередньо закладеними дефектами розмірами від 2 до 20 мм. В якості навантаження використовували термічний та механічний спосіб, а також внутрішній тиск.

В титанових конусах виявлено дефектні ділянки у вигляді корозійного стоншення матеріалу з внутрішньої сторони розмірами 15×10 та 20×2 мм. В якості навантаження застосовували

термічний спосіб, а саме, обдув повітрям температурою близько 100°C впродовж 5...10 с.

Запис широграм здійснювали з двократним оптичним збільшенням як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ або ОУ дорівнювала 5 мм. Результати, які характеризують наявність дефекту на внутрішній поверхні досліджуваного об'єкта наведено на рис. 2, 3. Розподіл похідної $\partial w/\partial x$ або $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу відображав деформування із площини поверхні в контрольованій зоні поверхні конуса. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектної зони (позначена стрілкою). Окрім закладеного дефекту у вигляді тріщини (рис. 3, в позначено літерою А), на досліджуваній ділянці поверхні конусного елемента № 2 виявлено дефект розмірами близько 5 мм в діаметрі (позначено літерою Б).

Проведені експериментальні дослідження титанових та сталевих конусних елементів (рис. 1, б, в), спрямовані на виявлення попередньо закладених дефектів в зварному шві. Дефекти мали розміри 7×2 мм (сталеві конуси) та пори менше 2 мм (титанові конуси). В якості навантаження

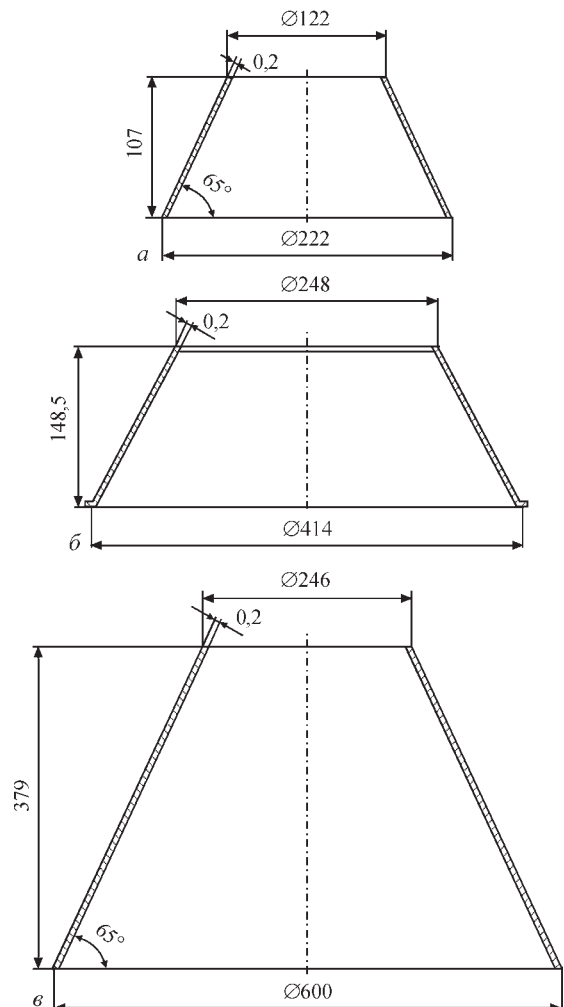


Рис. 1. Схеми контрольованих сталевих і титанових гофрованих конусних елементів (опис див. у тексті)

використовували термічний спосіб, а саме, обдув повітрям температурою близько 100 °С (для сталевих) та 150 °С (для титанових) впродовж 5...10 с.

Запис широграм здійснювали з оптичним збільшенням 2,5:1 як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОУ дорівнювала 5 мм. Результати, які характеризують наявність дефекту на внутрішній поверхні зварного шва досліджуваного об'єкта наведено на рис. 4, б-г та рис. 5, б-г. Розподіл похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу відображав деформування із площини поверхні в контрольованій зоні поверхні конуса. Локальна різка зміна величини та знаку похід-

ної на фоні регулярно відображених гофрів характеризує наявність дефектної зони (позначена стрілкою).

При конструюванні елементів та вузлів КПО, які використовують в аерокосмічній промисловості, важливими є дослідження на стійкість під навантаженням оболонок довільної форми, гладких та підкріплених, ізотропних та анізотропних, деформованих в межах та за межами пружності. У зв'язку з цим проведено експериментальні дослідження, спрямовані на розробку ширографічної технології виявлення зон втрати стійкості елементів конічних КПО під дією механічного навантаження уздовж осі конуса та термічного

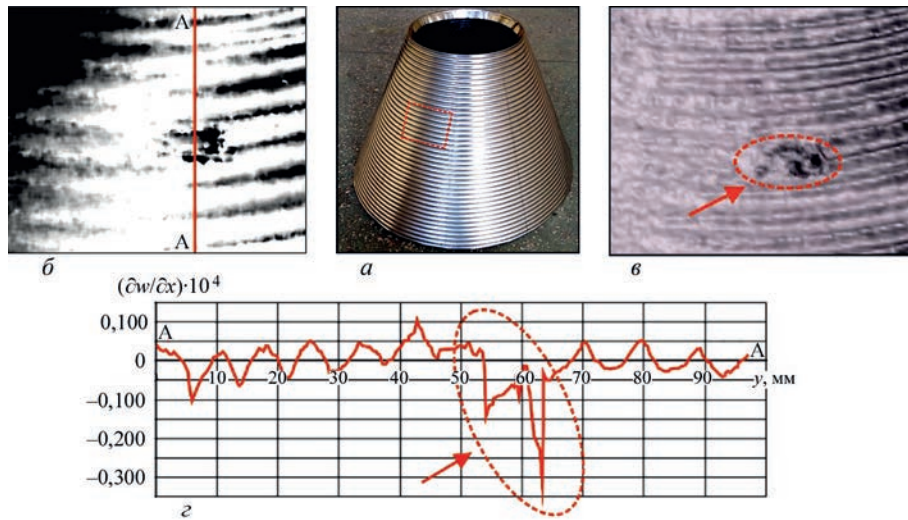


Рис. 2. Неруйнівний контроль якості титанового (ВТ1-0) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 10 с, на стадії охолодження): а – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; б – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці з дефектом поверхні конуса на стадії охолодження; г – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначене стрілкою)

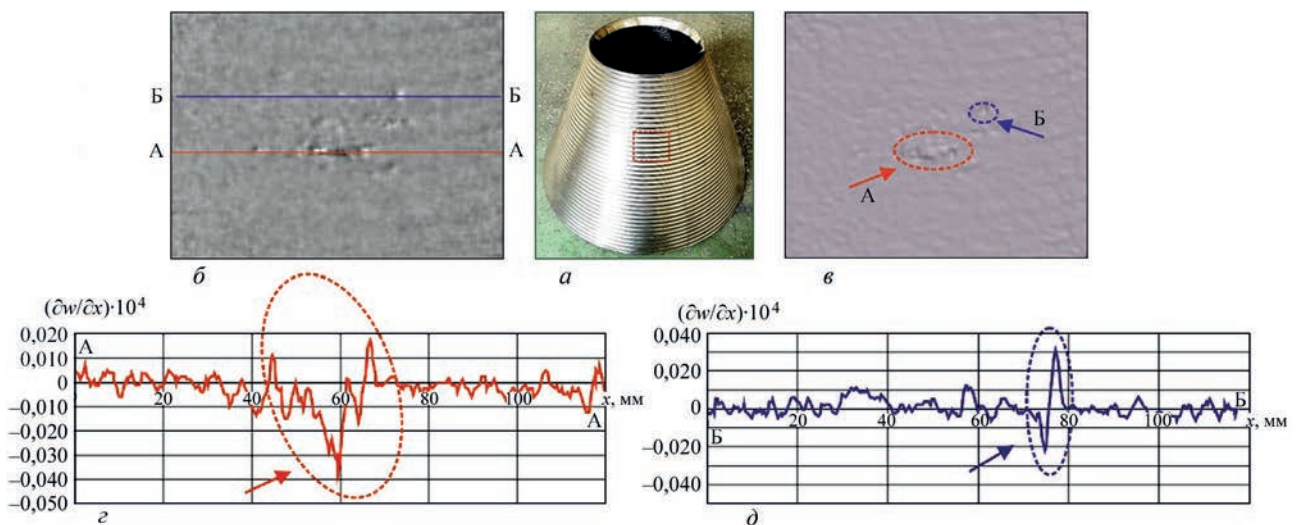


Рис. 3. Неруйнівний контроль якості титанового (ВТ1-0) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 5 с, на стадії охолодження): а – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; б – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами А-А і Б-Б; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці з дефектом поверхні конуса на стадії охолодження; г, д – криві зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраних перерізів А-А та Б-Б (місця дефектів позначені стрілками)

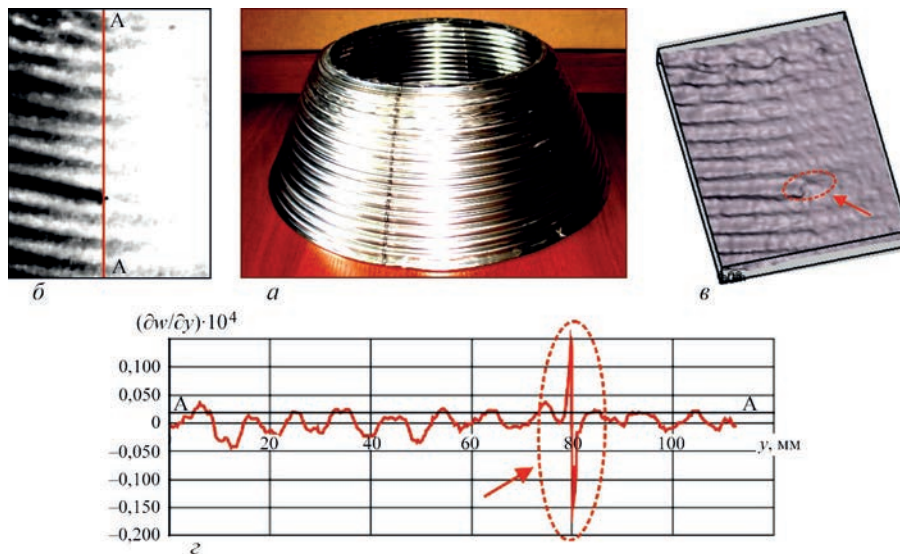


Рис. 4. Неруйнівний контроль якості сталевого (12X18H10T) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 10 с, на стадії охолодження): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *b* – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *c* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці з дефектом поверхні конуса на стадії охолодження; *d* – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначено стрілкою)

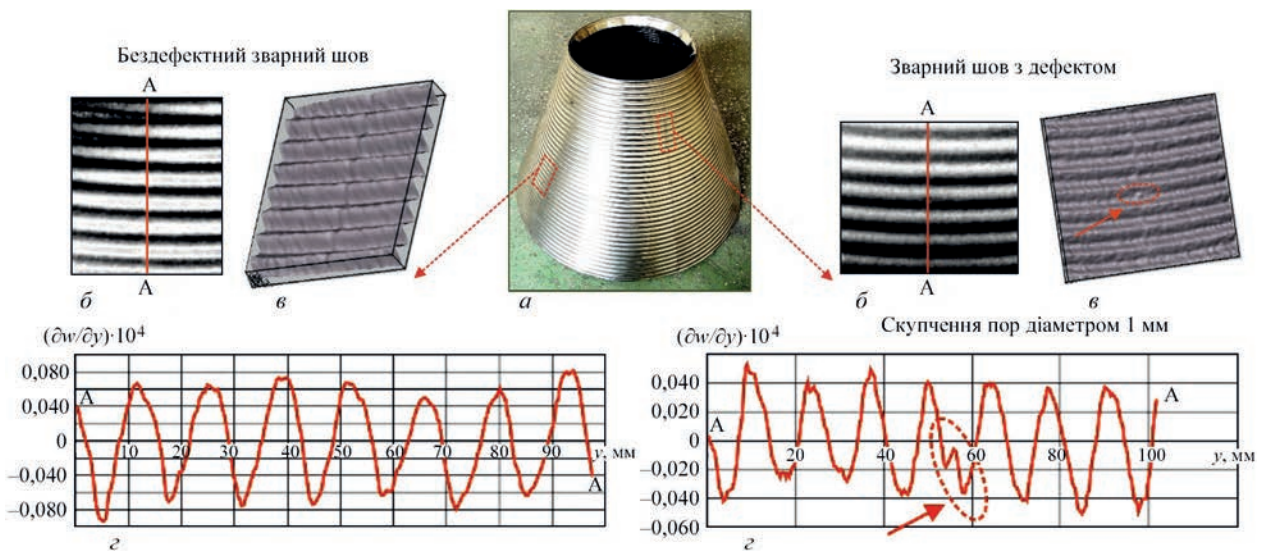


Рис. 5. Неруйнівний контроль якості титанового (BT1-0) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 150 °С впродовж 10 с, на стадії охолодження): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *b* – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *c* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні конуса на стадії охолодження (у випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою); *d* – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А з дефектом; *e* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні конуса на стадії охолодження (у випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою); *f* – криві зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (у випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою)

навантаження перпендикулярного досліджуваній поверхні.

В якості об'єкта досліджувався конусний елемент, виготовлений зі сталі 12X18H10T, розмірами $\varnothing 414 \times \varnothing 248 \times 148,5$ мм, що мав 15 гофрів (рис. 1, б). Велику та малу основу конуса фіксували з використанням двох дисків, які зв'язували між собою за допомогою гвинта, розміщеного уздовж осі конуса. Застосовували навантаження шляхом вкручування гвинта, що призводило до стискання дисків. При термічному навантаженні використо-

ували промисловий фен з метою обдуву струменем теплого повітря температурою близько 100 °С впродовж 10...15 с.

Запис широграм здійснювали з оптичним збільшенням 2,5:1 як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОУ дорівнювала 5 мм. Експерименти проводили із поступовим збільшенням стискання фіксуючих дисків та обдуву контрольованої ділянки конусу струменем теплого повітря. Отримані результати, що характеризують наявність зон

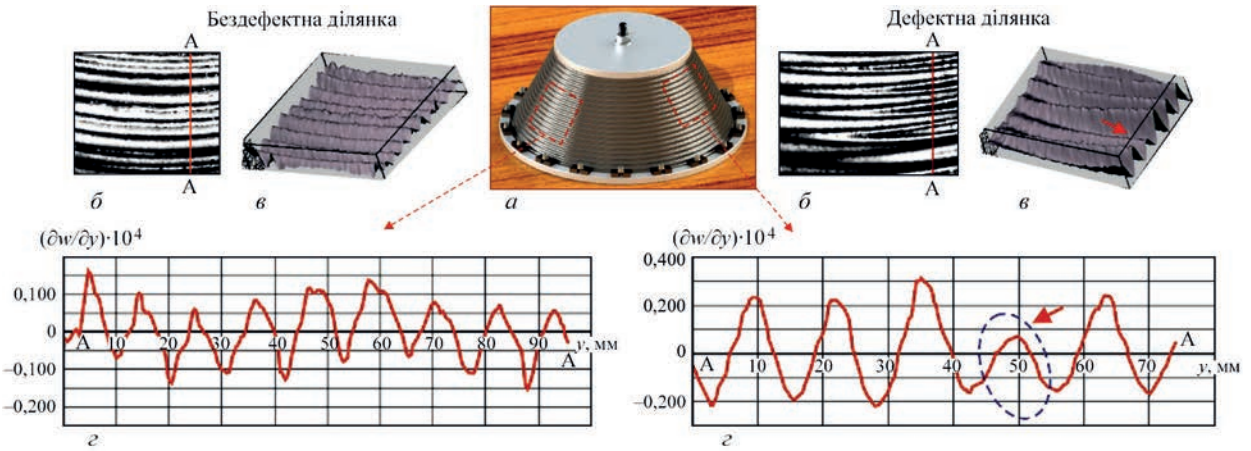


Рис. 6. Ширографічна діагностика сталевго (12X18H10T) конуса на бездефектній ділянці та із зоною втрати стійкості в одному гофрі, що знаходяться під дією комбінованого навантаження (механічне + термічне): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *б* – широграми з нанесеним досліджуваним перерізом А-А на бездефектній ділянці та з дефектом, відповідно; *в* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні конуса на стадії охолодження (*y* випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою); *г* – криві зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (*y* випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою)

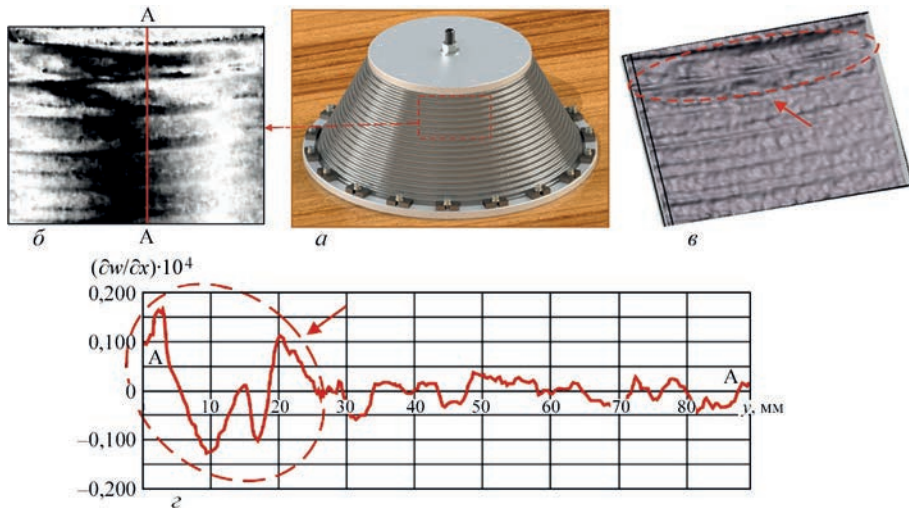


Рис. 7. Ширографічна діагностика сталевго (12X18H10T) конуса із зоною втрати стійкості, що виявлена під дією комбінованого навантаження (механічне + термічне): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *б* – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *в* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці з зоною втрати стійкості поверхні конуса на стадії охолодження; *г* – крива зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначене стрілкою)

втрати стійкості досліджуваного об'єкта наведено на рис. 6, 7.

Під час розробки технології виявлення дефектних зон та контролю ділянок втрати стійкості, в якості досліджуваного об'єкта використовували конічні елементи КПО у розгорнутому вигляді. Показано, що метод електронної ширографії у поєднанні з механічним та термічним навантаженням дозволяє виявляти дефектні ділянки у вигляді корозійних пошкоджень, дефектів зварного з'єднання і зони втрати стійкості під впливом зовнішнього навантаження.

Розглянуто можливість контролю якості конічних елементів КПО у вигляді гофрованих дисків до їх розгортання, з використанням методу електронної ширографії. Проводили експеримен-

ти, спрямовані на дослідження конічних дисків зі сталі 12X18H10T та 08X18H10T розмірами $\varnothing 222 \times \varnothing 122 \times 107$ мм, що мали, відповідно, 6 та 8 гофрів (рис. 1, *a*). Для навантаження конічних дисків використовували термічний спосіб, а саме обдув струменем повітря з температурою близько 150 °С, та внутрішній тиск, який здійснювали шляхом накачування або стравлювання повітря з контролем його значень за допомогою манометру, при герметизованих великій і малій основах гофрованих дисків (рис. 1).

Проведення експериментальних досліджень контролю якості елементів КПО у вигляді нерозгорнутих гофрованих дисків з використанням розробленого програмного забезпечен-

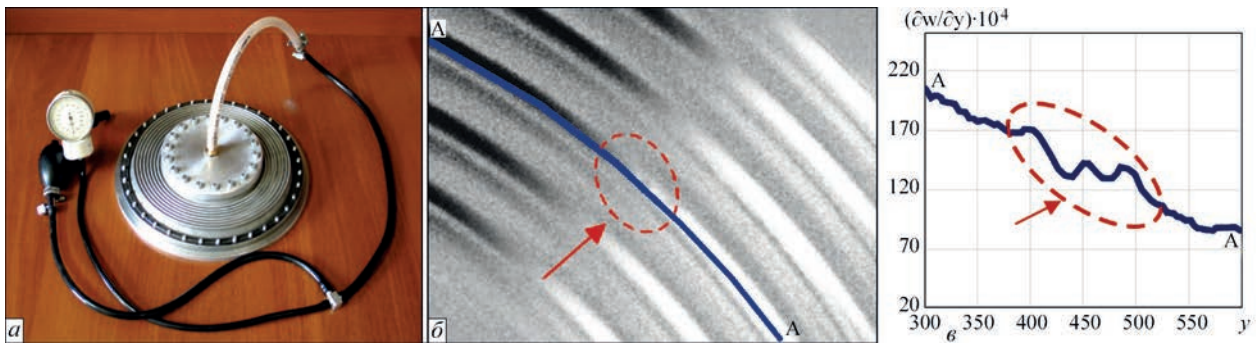


Рис. 8. Ширографічний контроль якості сталевого (08X18H10T) кінцевого складеного гофрованого диску з використанням комбінованого навантаження: *a* – загальний вигляд досліджуваного диску, зафіксованого в навантажувальному пристрої; *б* – широграма контрольованої дефектної ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *в* – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж перерізу, що співпадає з верхівкою гофра, на досліджуваній ділянці поверхні диску на стадії охолодження (дефектна ділянка позначена стрілкою)

ня дозволило виявити попередньо закладені дефекти на ділянці поверхні, що знаходиться на верхівці складеного гофра. Запис широграм здійснювався з оптичним збільшенням 2,5:1 з використанням навантаження внутрішнім тиском або комбінованого навантаження – підвантаження внутрішнім тиском до певної величини і обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 5...10 с. Величина широзсуву уздовж напрямку гофра дорівнювала 3 мм. На рис. 8 наведено результати ширографічного контролю якості кінцевого нерозкритого гофрованого диску з використанням комбінованого навантаження на ділянці, що містить дефект розмірами 5×0,8 мм, який розташований у верхівці складеного гофра.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження із застосуванням методу електронної ширографії, спрямовані на розробку технології неруйнівного контролю якості елементів та вузлів тонкостінних КПО космічного призначення при навантаженні їх термічним, механічним та комбінованим способами.

Отримані результати проведених досліджень підтвердили можливість та доцільність діагностики конусних елементів КПО з використанням методу електронної ширографії у поєднанні з термічним навантаженням при неруйнівному контролі якості та комбінованим навантаженням (механічне стискання плюс термічний обдув) для виявлення зон втрати стійкості.

Виконані експериментальні дослідження показали, що застосування методу електронної ширографії з використанням розробленого програмного забезпечення у поєднанні з навантаженням внутрішнім тиском або комбінованим методом (внутрішній тиск плюс термічний обдув) для

виявлення дефектних зон, дозволяє проводити діагностику нерозгорнутих конусних елементів КПО у вигляді гофрованих дисків.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Волков В.С. (2011) Конструкции преобразуемого объема (Обзор). *Автоматическая сварка*, **12**, 30–39.
2. Лобанов Л.М., Волков В.С. (2014) Конструкции преобразуемого объема космической техники. *Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. Вып. 2*. Днепропетровск, ГП КБ «Южное», сс. 55–60.
3. Paton B.E., Lobanov L.M., Volkov V.S. (2015) Metal transformable-volume structures for space engineering. *Acta Astronautica*, **110**, 50–57. Doi: 10.1016/j.actaastro.2015.01.005.
4. Hung Y.Y., Ho H.P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Materials Science and Engineering*, **R49**, 61–87.
5. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкая Е.М., Киянец И.В. (2008) Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 7–13.
6. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Киянец И.В., Олейник Е.М. (2004) Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций. *Там же*, **3**, 25–28.

References

1. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Volkov, V.S. (2011) Transformable structures (Review). *The Paton Welding J.*, **12**, 25-33.
2. Lobanov, L.M., Volkov, V.S. (2014) Transformable volume structures for space engineering. *Space engineering. Rocket armaments*. In: *Transact. Issue 2*, Dnepropetrovsk, GP KB Yuzhnoe, 55-60 [in Russian].
3. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Volkov, V.S. (2015) Metal transformable-volume structures for space engineering. *Acta Astronautica*, **110**, 50-57. Doi: 10.1016/j.actaastro.2015.01.005.
4. Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Mater. Sci. & Engin.* **R49**, 61-87.
5. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitskaya, E.M., Kiyansets, I.V. (2008) Diagnostics of structural elements and assemblies with application of the method of electron shearography. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 7-13 [in Russian].
6. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Oleinik E.M., Kiyansets, I.V. (2004) Procedure, technology and instrumentation of shearographic nondestructive testing of materials and elements of structures. *Ibid.*, **3**, 25-28 [in Russian].

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕОБРАЗУЕМОГО ОБЪЕМА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ МЕТОДОМ ШИРОГРАФИИ

Л.М.Лобанов, В.А. Пивторак, И.В. Киянец, В.В. Савицкий

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

По результатам экспериментальных исследований, проведенных методом электронной широгрфии, разработана технология неразрушающего контроля качества и выявления зон потери устойчивости элементов и узлов тонкостенных конструкций преобразуемого объема космического назначения при нагрузке их внутренним давлением, термическим, механическим и комбинированным способами. Эффективность применения предложенных технологий была подтверждена при проведении экспериментов по диагностике натуральных как развернутых конусных элементов конструкций преобразуемого объема, так и неразвернутых в виде гофрированных дисков. Библиогр. 6, рис. 8.

Ключевые слова: конструкции преобразуемого объема, неразрушающий контроль качества, электронная широгрфия

NONDESTRUCTIVE TESTING OF ELEMENTS OF THIN-WALLED TRANSFORMABLE STRUCTURES FOR SPACE APPLICATIONS BY SHEAROGRAPHY METHOD

L.M. Lobanov, V.A. Pivtorak, I.V. Kiyaneets, V.V. Savitsky

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Results of experimental studies conducted by electron shearography method were used to develop the technology of nondestructive testing of quality and detection of buckling zones in elements and components of thin-walled transformable structures for space applications at their loading by internal pressure, by thermal, mechanical and combined methods. Effectiveness of application of the proposed technologies was confirmed during performance of experiments on diagnostics of both full-scale deployed conic elements of transformable structures and non-deployed ones in the form of corrugated discs. 6 Ref., 8 Fig.

Keywords: transformable structures, nondestructive testing of quality, electronic shearography

Надійшла до редакції
20.02.2019

ХVІІІ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2019

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

19 - 22 листопада

МЕТАЛЛО-БРОСКА УКРАЇНІЗАЦІЯ ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА ВІДШИВНИКІ UKRTECH УКРАЇНВО УКРПРОМ АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗРАДКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ ВІДОМО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА



ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: **ОБОРУДОВАННЯ ІНСТРУМЕНТ**
Ексклюзивний медіа партнер: **ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА**

Технічний партнер: **ReutMedia**

IEC

Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЛНАМИ, ВОЗБУЖДАЕМЫМИ И ПРИНИМАЕМЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ (Обзор, ч. 2)

Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, С.Ю. Плеснецов

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2.
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Выполнен анализ информационных источников, в которых приведены данные о чувствительности ультразвукового неразрушающего контроля поверхностными волнами металлоизделий приборами и установками с электромагнитно-акустическими преобразователями. Установлено, что по сравнению с традиционным контактным методом контроля в своей области применения: контроль металлов без специальной подготовки поверхности, автоматический и автоматизированный контроль с высокой производительностью, электромагнитно-акустический контроль имеет заметные преимущества. Во многих случаях чувствительность дефектоскопии с применением электромагнитно-акустических преобразователей не уступает традиционному контактному методу, а в некоторых случаях даже превышает его. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: металлоизделие, ферромагнитный, качество, дефект, электромагнитно-акустический, преобразователь, дефектоскопия, чувствительность контроля

В статье [1] рассмотрены общие данные о чувствительности электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей (ЭМАП), которые подтверждают перспективность их использования. Однако по-прежнему многие разработчики и исследователи считают, что главным недостатком ЭМАП является низкая чувствительность к несоответствиям объектов контроля (ОК), выявление которых регламентируется нормативно-технической документацией. Такое положение приводит к сравнительно незначительному объему разработок ЭМА оборудования и, соответственно, их использованию. В то же время, в отличие от традиционного контактного метода ультразвукового контроля (УЗК) [2], представляется чрезвычайно эффективным применения ЭМАП для контроля поверхности ОК волнами Рэлея или тонкостенных изделий (трубы, листы) волнами Рэлея и Лэмба [3].

Целью работы является оценка по чувствительности новых возможностей ЭМАП при УЗК поверхности ОК сложной формы или имеющих значительную площадь поверхности.

Чувствительность ЭМАП при контроле поверхности металлоизделий. Достаточно полно результаты выполненных экспериментальных исследований по обнаружению дефектов поверхности поверхностными волнами представлены в работе [4]. Авторами для выполнения исследований листовых и трубчатых ОК был разработан и изготовлен стенд (рис. 1).

Для выполнения экспериментальных исследований ЭМАП изготавливались в совмещенном, раздельно-совмещенном или в раздельном вариантах.

Во всех случаях индукторы ЭМАП выполняли в виде зигзагообразных плоских катушек [5] с шагом равным половине длины волны ультразвуковых колебаний на частотах в диапазоне 0,2...1,0 МГц. Длительность импульсов ультразвуковых колебаний устанавливали из интервала 3...8 периодов частоты заполнения импульсов. Амплитуда импульса тока в индукторе ЭМАП достигала 200 А. При использовании постоянного поляризуемого магнитного поля его величину выбирали минимальной (0,3...0,4 Тл). Это необходимо для обеспечения приемлемых условий для работы оператора дефектоскопа с ЭМАП.

На первом этапе исследований авторами установлено, что отраженный из ОК сигнал, достаточ-

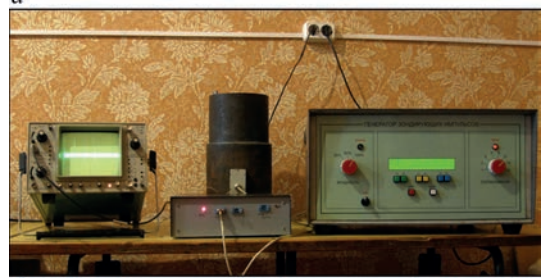


Рис. 1. Стенд для исследований по обнаружению поверхностных дефектов листов (а) и трубчатых (б) ОК импульсами волн Рэлея или Лэмба



Рис. 2. Реализации для случаев бездефектного участка (а) листа из стали 09Г2С и при наличии поверхностного дефекта (в) в виде риски (б) размерами 35×1×2,2 мм (описание 1–3 см. в тексте)

ный по амплитуде для оценки качества поверхности, принимается на расстояниях до 3...5 м как на плоском ОК (лист со ржавой поверхностью), так и на поверхности с кривизной (труба). Частота УЗК составляла 0,9 МГц. Следовательно, при каждом зондировании ультразвуковым импульсом можно контролировать значительную площадь изделия, повышая тем самым производительность неразрушающего контроля.

На втором этапе были исследованы возможности выявления поверхностных дефектов на различных металлоизделиях. Временная развертка (реализация) для случая бездефектного участка листа показана на рис. 2, а. Реализация при наличии поверхностного дефекта в виде риски (рис. 2, б) размерами 35×1×2,2 мм приведена на рис. 2, в при расстоянии от ЭМАП до дефекта равном 1 м. В выполненных исследованиях использована частота 0,3 МГц. На рис. 2, а, в и, соответственно, на всех последующих рисунках с реализациями, цифрой 1 обозначен зондирующий импульс, 2 – импульс от торца изделия (на трубчатом изделии обегаящий по окружности импульс) и 3 – импульс от дефекта.

Стенд для УЗК трубчатых ОК приведен на рис. 1, б. Отображенные эхо-сигналы представлены после предварительного усиления без применения обработки. Изображения дефектов и соответствующие им реализации для случаев наличия поверхностных дефектов в виде продольной риски размерами 60×0,2×1 мм, сквозного отверстия диаметром 2,8 мм, забоины глубиной до 0,4 мм на поверхности обсадной трубы бывшей в эксплуатации, приведены, соответственно, на рис. 3.

Образец из заготовки железнодорожной оси и реализация для случая бездефектного участка приведены на рис. 4. Реализа-

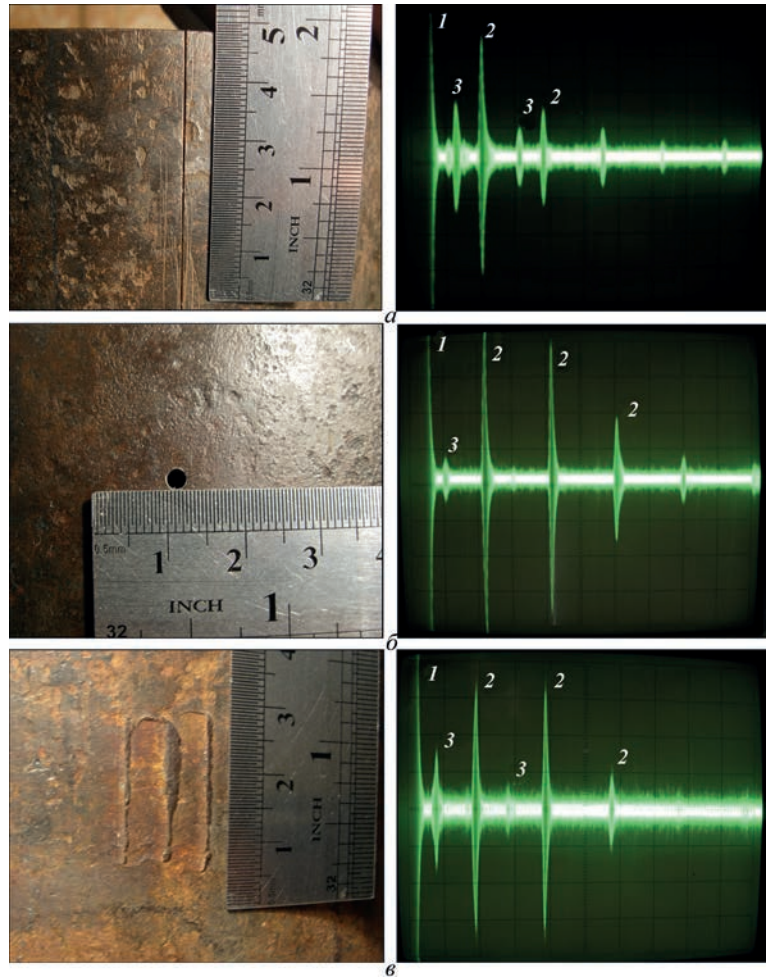


Рис. 3. Поверхностные дефекты и соответствующие им реализации, полученные с помощью стенда приведенного на рис. 1, б на образце обсадной трубы бывшей в эксплуатации (описание см. в тексте)



Рис. 4. Образец железнодорожной оси и соответствующая реализация обегаящих по окружности импульсов в отсутствие поверхностного дефекта

ции, при наличии поверхностных дефектов в виде засверловки диаметром 3 мм и продольной риски размерами 15×0,45×0,35 мм, приведены на рис. 5.

Образец из заготовки круглого сечения диаметром 230 мм с установленным на нем ЭМАП показан на

рис. 6, а. Вид естественного поверхностного дефекта на поверхности заготовки (рис. 6, б) и соответствующая ему реализация, приведены на рис. 6, в.

Особенно эффективен УЗК с применением ЭМАП метода для обнаружения поверхностных дефектов

на участках изделий с выпуклой и вогнутой поверхностью, например, на головке рельса. Схемы контроля поверхности головки рельса ЭМАП показаны на рис. 7, где буквой «Д» обозначен поверхностный дефект. ЭМАП при необходимости может располагаться на рельсе с зазором h , что исключает трение и износ индуктора датчика. Реализации для случаев обнаружения моделей дефектов в виде продольных и поперечных канавок раскрытием 0,15...0,2 мм и глубиной 0,5...0,8 мм, расположенных на различных участках поверхности головки в соответствии со схемами (рис. 7), приведены на рис. 8.

Для определения численных величин амплитуд эхо-импульсов поверхностных волн, отраженных моделями дефектов, выполнены дополнительные исследования, схемы которых приведены на рис. 9. Модель дефек-

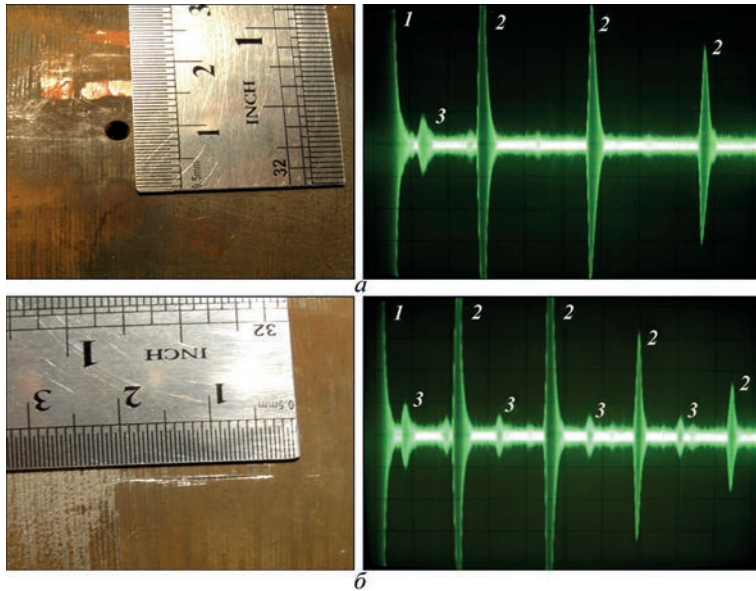


Рис. 5. Модели дефектов на поверхности круглой заготовки диаметром 170 мм и соответствующие им реализации, полученные с помощью стенда рис. 1, б (описание см. в тексте)



Рис. 6. Образец из заготовки круглого сечения (а), фото естественного дефекта (б) и реализация с эхо-импульсом от этого дефекта (в) (описание 1, 3 см. в тексте)

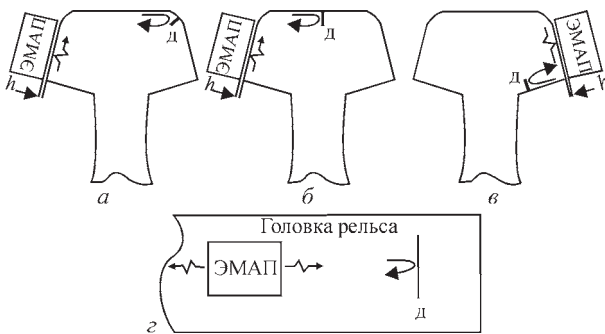


Рис. 7. Схемы УЗК различных участков поверхности головки рельса: а – продольный дефект на выпуклой поверхности верхней части головки рельса размерами 40×0,45×0,7 мм; б – продольный дефект на средней части поверхности головки рельса размерами 40×0,45×0,5 мм; в – продольный дефект на вогнутой поверхности подголовочной части головки рельса размерами 45×0,2×0,85 мм; г – поперечный дефект на поверхности верхней части головки рельса размерами 40×0,45×0,8 мм

та представляла собой продольную канавку длиной 50 мм и глубиной 0,5 мм, располагаемую по отношению к ЭМАП на различных расстояниях. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1 показывает, что отношение амплитуд эхо-сигналов от дефектов к амплитуде шума, даже без применения методов обработки, являются достаточными для обеспечения эффективного контроля криволинейных поверхностей. При этом не требуется зачистка поверхности изделия.

Следует отметить, что в промышленности используется значительное количество изделий в виде труб и изготовленных из них элементов оборудования. Материал таких ОК может быть различным. Для исследования выявляемости де-

Таблица 1. Результаты измерений амплитуд эхо сигналов, отраженных моделью дефекта длиной 50 мм и глубиной 0,5 мм и находящихся на поверхностях рельса с различной кривизной [6]

Номер дефекта (рис. 9)	Отношение амплитуд эхо-сигнала и шума, раз		
	Схема а	Схема б	Схема в
1	72	21,5	29,0
2	66	15	22,0
3	56	13,7	17,4
4	20	–	–
5	16	–	–

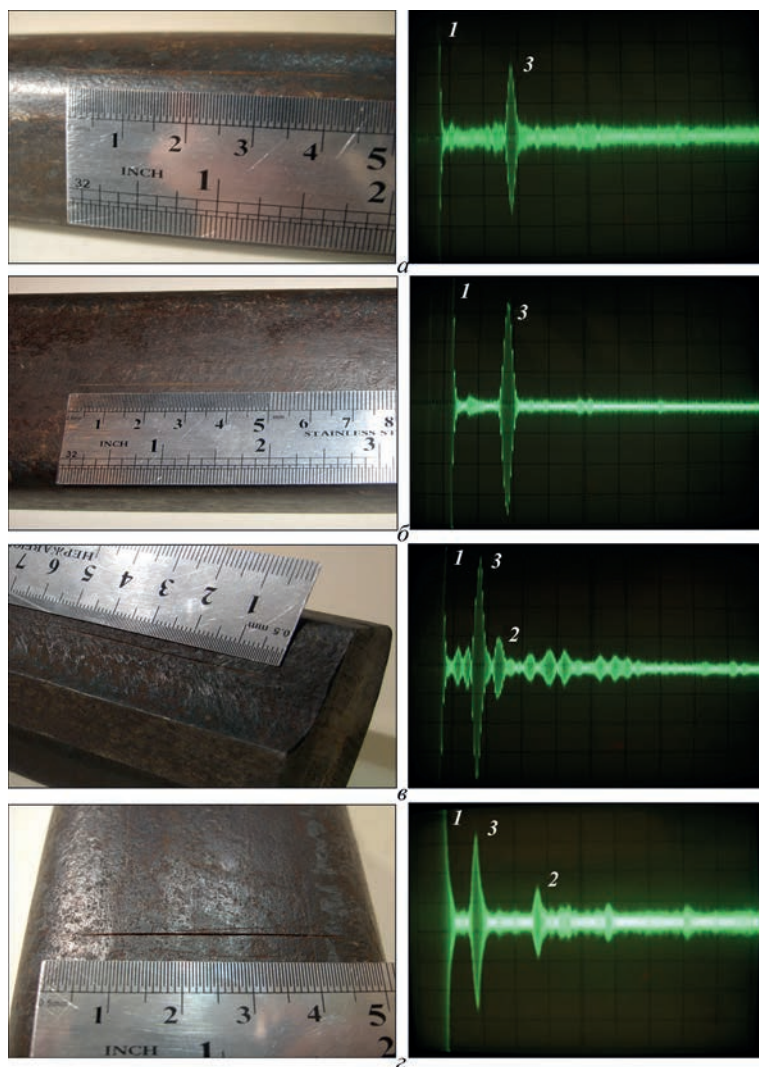


Рис. 8. Изображения моделей дефектов на поверхности головки рельса (а–д – см. рис. 7) и соответствующие им реализации, полученные при УЗК поверхностными волнами с применением ЭМАП

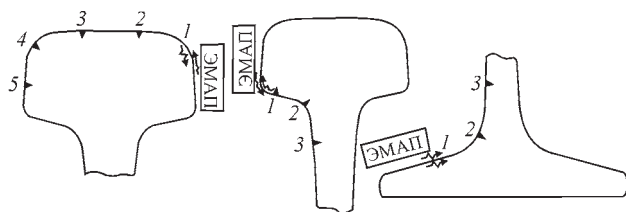


Рис. 9. Схемы контроля участков поверхности головки рельсов для оценки амплитуд эхо-сигналов, полученных с применением ЭМАП (1–5 – условные номера дефектов)

фектов в таких изделиях авторами работы [7] были отобраны образцы от ферромагнитных труб серийного производства в состоянии поставки с завода – шероховатая с окалиной и ржавчиной поверхность. Исследованы пробы от труб диаметром 17 мм и более. Диапазон толщины стенок лежал в интервале от 1,0 до 11,7 мм. В пробах на внутренней и наружной поверхностях были изготовлены пазы с раскрытием от 0,15 до 0,3 мм, глубиной от 0,1 до 8 мм, длиной более 10 мм, а также сверления в стенке трубы параллельно образующей диаметром 1,3...2,5 мм на глубину более 25 мм. Исследованы естественные дефекты раскрытием менее 0,1 мм и прямые сварные швы с дефектом типа непровар и без него.

Ультразвуковые импульсы возбуждались и принимались комбинированным ЭМАП [5] при одностороннем доступе к поверхности трубчатого образца. Рабочая зона ЭМАП имела размеры 6×12 мм². Величина поляризующего магнитного поля составляла 0,6 Тл. Зазор между ЭМАП и поверхностью металла 0,5 мм. Исследования выполнены в частотном диапазоне 2,0...2,7 МГц. Длительность импульсов изменяли в интервале от 1 до 18 периодов ультразвуковых колебаний. Оценку величины дефектов проводили по отношению амплитуд пакетных импульсов принятых эхо-сигналов и шума. Наиболее характерные результаты выполненных исследований приведены в табл. 2.

Анализ результатов выполненных исследований позволил сделать следующие выводы. Применение разработанного нового ЭМА способа дефектоскопии изделий дает возможность уверенно обнаруживать эхо-методом продольные и поперечные дефекты на наружной и внутренней поверхностях труб, а также внутренние дефекты в стенках труб, в листах при доступе с одной из сторон. С высокой степенью надежности определяются дефекты типа трещин, представляющие особую опасность при эксплуатации. Обнаружены дефекты с раскрытием менее 0,1 мм и глубиной более 0,2 мм. Успешно выявили внутренние дефекты в виде отверстия диаметром 1,3 мм и более, а также не-

Таблица 2. Результаты исследований выявляемости дефектов в образцах, отобранных от труб разного производства, изготовленных из различных материалов [7]

Исследуемый объект	Дефект и его параметры	Отношение амплитуд эхо-сигнала и шума, раз	Расстояние от поверхности до дефекта, мм
Обточенная обсадная труба диаметром 168 мм, стенка 10,4 мм (сталь по ГОСТ 632-80)	Продольный прямоугольный паз длиной $a = 16$ мм, раскрытием $\epsilon = 0,3$ мм и глубиной $c = 0,82$ мм на наружной поверхности	42	0
	То же на внутренней поверхности	41	Толщина стенки
	Отверстие диаметром 1,3 мм в середине стенки глубиной 25 мм, просверлено вдоль образующей трубы	8	1/2 толщины стенки
Обсадная труба диаметром 168 мм с муфтой. Поверхность черновая. Стенка 10,6 мм	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 16$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,8$ мм	28	0
«-» на муфте	То же с $a = 16$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,6$ мм	11,5	0
«-» на трубе	Продольный паз на внутренней поверхности трубы с $a = 22$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 1$ мм	38,9	Толщина стенки
	Поперечный паз на наружной поверхности с $a = 12$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,8$ мм	32	0
Обсадная труба диаметром 168 мм, разнотолщинность стенки от 11,7 до 12,3 мм	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 120$ мм, $\epsilon = 0,15$ и c , мм: 1,20 1,05 0,83 0,56 0,37 0,22	53	0
		48	0
		46	0
		40	0
		33	0
		21	0
	Поперечный паз на наружной поверхности с $a = 12,5$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,6$ мм	28	0
Продольный паз на внутренней поверхности с $a = 32$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 1,7$ мм	50	Толщина стенки	
	Продольное отверстие в стенке диаметром 2 мм на глубину 34 мм	33	1/2 толщины стенки
Чугунная гильза для двигателей грузовиков диаметром 132 мм, стенка 7 мм	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 28$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,3$ мм	9,4	0
Труба сварная (по образующей) диаметром 32 мм, стенка 2 мм (Ст3)	Бездефектный сварной шов	5,7	0
	Непровар в сварном шве длиной 6 мм	11,8	0
Труба сварная (по образующей) диаметром 28 мм, стенка 1 мм (сталь 3)	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 21,5$, $\epsilon = 0,2$ мм, $c = 0,2$ мм	7,7	0
Труба диаметром 51,3 мм, стенка 3,5 мм (сталь 45)	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 31$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,2$ мм	54	0
	То же на внутренней поверхности с $a = 40$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,2$ мм	43	0
Труба диаметром 32 мм, толщина стенки 6,3 мм (легированная сталь)	Естественная трещина на наружной поверхности с $a \approx 34$ мм, $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,2$ мм	8,6	0
	То же на внутренней поверхности с $a \approx 18$ мм, $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,4$ мм	28	0
Труба диаметром 17 мм, стенка 3,5 мм (легированная сталь)	Естественная трещина на наружной поверхности по всей длине с $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,2$ мм	6	0
Труба диаметром 24 мм, стенка 2,5 мм (легированная сталь)	Естественная трещина на наружной поверхности по всей длине с $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,2$ мм	8	0

провары в сварных швах и сами сварные швы на фоне основного металла.

Приведенные данные опровергают мнение о недостаточной чувствительности ультразвукового контроля ОК поверхностными волнами устройствами с ЭМАП.

Выводы

1. Экспериментальными исследованиями установлена возможность ультразвукового ЭМА контроля поверхности листовых и трубчатых изделий с высокой чувствительностью с использованием волн Рэлея и Лэмба.

2. При проведении ЭМА дефектоскопии специальную зачистку поверхности ОК можно не проводить.

3. Практически все типоразмеры труб, листов, заготовок и рельсов можно контролировать одним и тем же ЭМАП.

4. На результатах контроля ЭМАП волнами Рэлея не сказывается разнотолщинность и овальность труб.

5. Использование ЭМАП волн Рэлея обеспечивает высокую чувствительность дефектоскопии на плоских, выпуклых и вогнутых поверхностях ОК.

Список литературы

1. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. (2018) Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 1). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 45–50, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.04.06>.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. (2004) *Неразрушающий контроль*. Справочник: В 7 т. Клюев В.В. (ред.). Т.3: Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение.
3. (2019) *Corrosion Under Insulation and Fireproofing* [Электронный ресурс]. American Petroleum Institute, 110. http://www.txis.org/txis/API_RP_583_Rev2_2019.pdf
4. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Хащина С.В. и др. (2013) Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных металлоизделий. *Контроль. Диагностика*, **4**, 31–35.
5. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю., Мещеряков С.Ю., Юданова Н.Н. (2018) Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей. (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 27–34.

6. Сучков Г.М. (2005) *Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий*: дис. д-ра техн. наук. Харьков, НТУ «ХПИ».
7. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Гарькавий В.В. (2000) Возможности бесконтактных электромагнитных методов неразрушающего контроля качества труб. *Питання розвитку газової промисловості України. Вип. XXVIII. Діагностування трубопроводів, технологічного і енергомеханічного обладнання нафтової та газової промисловості*. УкрНДІГаз, сс. 102–109.

References

1. Suchkov, G.M., Plesnetsov, S.Yu. (2018) Sensitivity of testing via electromagneto-acoustic transducers (Overview, p. 1). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 45–50 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.04.06>.
2. Ermolov, I.N., Lange, Yu.V. (2004) *Nondestructive testing*. In: Refer. book, 7 Vol., Ed. by V.V. Klyuev. Vol 3: Ultrasonic testing. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. (2019) *Corrosion under insulation and fireproofing*. American Petroleum Institute, 110. http://www.txis.org/txis/API_RP_583_Rev2_2019.pdf
4. Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N., Khashchina, S.V. et al. (2013) Enhancement of the capabilities of contactless flaw detection of the surface of rolled ferromagnetic metal products. *Kontrol, Diagnostika*, **4**, 31–35 [in Russian].
5. Suchkov, G.M., Plesnetsov, S.Yu., Mecheriakov, S.Yu. et al. (2018) New developments of electromagnetoacoustic transducers (Review). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 27–34 [in Russian].
6. Suchkov, G.M. (2005) *Development of the theory and practice of designing instrumentation for electromagnetoacoustic testing of metal products*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kharkov, NTU KhPI [in Russian].
7. Suchkov, G.M., Katasonov, Yu.A., Garkavy, V.V. (2000) Capabilities of contactless electromagnetic methods of NDT of pipes. *Questions of development of gas industry of Ukraine. Issue XXVI. Diagnostics of pipelines, process and electromechanical equipment of oil and gas industry*. UkrNDIGaz, 102–109 [in Russian].

ЩОДО ЧУТЛИВОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИМИ ХВИЛЯМИ, ЯКІ ЗБУДЖУЮТЬСЯ ТА ПРИЙМАЮТЬСЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ (Огляд, ч. 2)

Г.М. Сучков, О.М. Петрищев, С.Ю. Плеснецов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Виконано аналіз інформаційних джерел, в яких наведено дані щодо чутливості ультразвукового неруйнівного контролю поверхневими хвилями металовиробів приладами і установками з електромагнітно-акустичними перетворювачами. Встановлено, що в порівнянні з традиційним контактним методом контролю в своїй галузі застосування: контроль металу без спеціальної підготовки поверхні, автоматичний і автоматизований контроль з високою продуктивністю, електромагнітно-акустичний контроль має помітні переваги. У багатьох випадках чутливість дефектоскопії із застосуванням електромагнітно-акустичних перетворювачів не поступається традиційному контактному методу, а в деяких випадках навіть перевищує його. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: металовиріб, ферромагнітний, якість, дефект, електромагнітно-акустичний, перетворювач, дефектоскопія, чутливість контролю

ABOUT THE SENSITIVITY OF ULTRASONIC TESTING BY SURFACE WAVES EXCITED AND RECEIVED BY ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS (Review, p. 2)

G.M. Suchkov, O.N. Petrishchev, S.Yu. Plesnetsov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kirpichev Str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Analysis of information sources was performed. These sources give the data on the sensitivity of ultrasonic nondestructive testing of metal products by surface waves with instruments and systems with electromagneto-acoustic transducers. It is found that electromagneto-acoustic testing has noticeable advantages, compared to the traditional contact method of control in its application field, namely control of metals without any special preparation of the surface, automatic and automated testing with a high efficiency. In many cases the sensitivity of flaw detection with application of electromagneto-acoustic transducers is not inferior to the traditional contact method, and in some cases even exceeds it. 7 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: metal product, ferromagnetic, quality, defect, electromagneto-acoustic transducer, flaw detection, control sensitivity

Поступила в редакцію 11.12.2018

ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА РЕДУКТОРА ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРОКАТНОГО СТАНА 1680

А.В. Баглай¹, М.М. Кипин¹, М.А. Дубина²

¹ГП «ДИАМЕХ-УКРАИНА». 61105, г. Харьков, ул. Киргизская, 19, АБК-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

²ПАО «Запорожсталь». 69008, г. Запорожье, Южное шоссе, 72

С помощью внедренной вибродиагностической системы во всех клетях стана 1680 комбината «Запорожсталь» выполняется контроль технического состояния подшипниковых опор электродвигателей, редукторов и шестеренных клетей, а также зубчатых зацеплений. Даны общие сведения о системе. Приведены первые результаты диагностического анализа вибрационных сигналов и примеры обнаружения зарождающихся дефектов подшипников редуктора клетей 3 и 8, подтвержденные последующим предупредительным ремонтным воздействием. Библиогр. 3, рис. 11.

Ключевые слова: непрерывный прокатный стан 1680, горячая прокатка, система диагностики, вибрация, подшипники, повреждения

На отечественных металлургических комбинатах все шире внедряются системы диагностики механического оборудования [1]. Известно, что на комбинате им. Ильича для этих целей используется комплекс переносных приборов различного назначения. Имеются сведения об эффективности их применения в части предупреждения поломок [2].

На непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 1680 ПАО «Запорожсталь» в период 2016–2017 гг. установлена отечественная стационарная система вибромониторинга и диагностики «Прокат». Основу ее составляет система контроля технического состояния (СКТС) «КОРУНД» производства компании «ДИАМЕХ». Отличительной особенностью СКТС является: возможность непрерывной записи сигнала (до 180 с); разрешающая способность спектра до 25600 линий; статистический анализ переходных и установившихся режимов прокатки; автоматизированная диагностика и совместимость с ORACLE SQL (рис. 1).

Целью создания СКТС электродвигателей, силовых редукторов и шестеренных клетей на стане являлось построение современной многоуров-

невой масштабируемой системы, выполняющей анализ параметров работы оборудования и диагностику на основании измерений вибрационных сигналов и непрерывный мониторинг работоспособности данного оборудования.

Стан состоит из последовательно расположенных пяти черновых и шести чистовых клетей (рис. 1). На стане прокатываются полосы толщиной 1,5...6,0 мм шириной 900...1500 мм. Исходная заготовка представляет собой сляб толщиной 140...110 мм. Каждая клеть включает два опорных и два рабочих вала, которые приводятся от электродвигателя через редуктор, шестеренную клеть и универсальные шпиндели (рис. 2). Режим работы каждой клетки носит периодически повторяющийся характер и включает: холостой ход, захват полосы валками; установившийся процесс прокатки на постоянной скорости; выброс полосы из валков; холостой ход [3].

Каждая клеть оснащена от 7 до 11 датчиками, установленными на корпусном оборудовании. Места их расположения выбраны таким образом, чтобы можно было диагностировать подшипники и зубчатые зацепления муфт, редукторов и шестеренных клетей (рис. 1). Всего на клетях стана установлено 87 датчиков вибрации типа АС-104-1А,

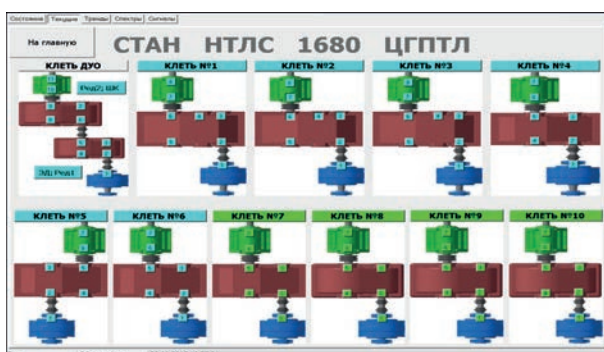


Рис. 1. Схема расположения датчиков вибрации в точках I – II линий привода клетей стана 1680 с цветовой индикацией: зеленый цвет транспарантов – показания в установившемся режиме прокатки; голубой – в режиме холостого хода

© А.В. Баглай, М.М. Кипин, М.А. Дубина, 2019

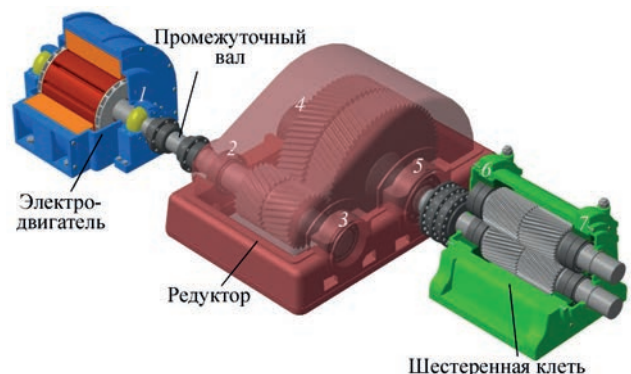


Рис. 2. Схема и линии привода валков прокатной клетки: 1–7 – точки установки датчиков вибрации

(виброускорение, виброскорость) с определением пик-фактора и эксцесса.

Задача данного сообщения состоит в том, чтобы привести первые положительные результаты эксплуатации системы.

Для удобства оперативного реагирования эксплуатационного персонала цеха на показания системы в программе реализована сигнализация по средним значениям основных вибрационных параметров согласно рис. 3 (A – виброускорение, m/c^2 , диапазон частот $2...10000$ Гц; V – виброскорость, mm/c , диапазон частот $2...1000$ Гц). Дополнительно контролируются: пик-фактор, эксцесс и виброускорение в 3-х диапазонах.

Усредненные значения вибрационных параметров по каждой точке контроля отображаются на экране монитора с учетом специфики прокатного производства: Час1 – среднее значение за 1 ч от текущего времени; Час2 – среднее значение за 2 ч от текущего времени; Сут – среднее значение за сутки.

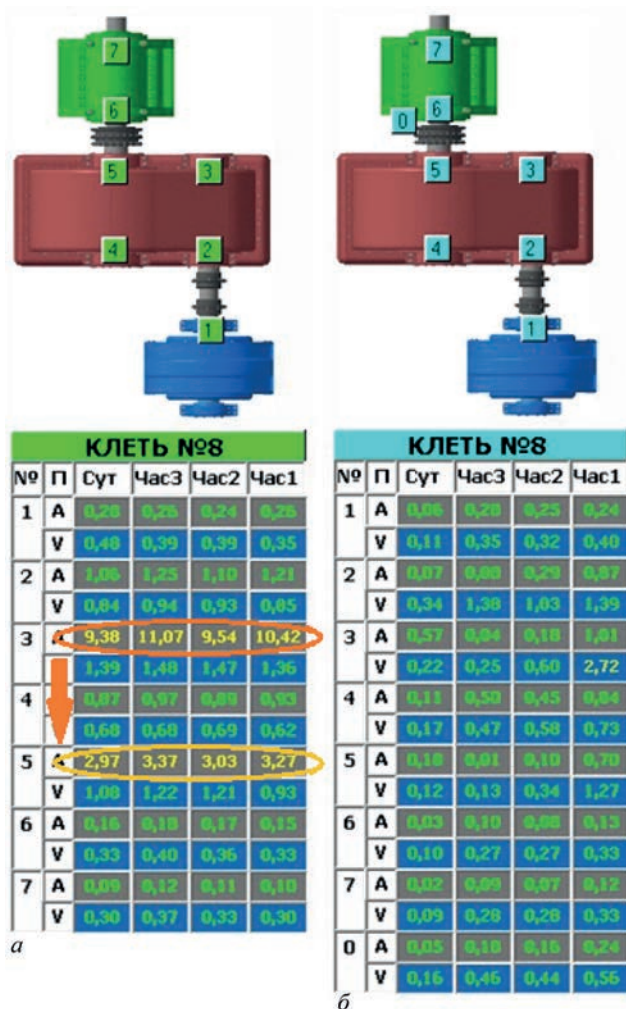


Рис. 3. Отображение вибросостояния узлов клетки 8: а – до ремонта; б – после ремонта (установлен дополнительный датчик на шестеренной клетке). Подшипник № 3: 97773 – рост виброускорения и его влияние на сопредельный подшипник № 5 (указано стрелкой)

Нормирование вибрационных параметров предусмотрено для двух режимов работы оборудования: установившийся процесс прокатки на постоянной скорости и холостой ход.

По результатам промышленной эксплуатации системы «ПРОКАТ» выявлена неисправность подшипника серии 97773 установленного на ведущем валу редуктора клетки 8 (точка 3 на рис. 2). Подшипник является роликовым, коническим, двухрядным, с внутренним дистанционным кольцом. Угол контакта, по которому воспринимается нагрузка, составляет $10...17^\circ$. Допустимая радиальная нагрузка у двухрядных подшипников в 1,7 раза выше, чем у аналогичных однорядных. Заданный зазор обеспечивается подшлифовыванием дистанционного кольца, установленного между внутренними кольцами. Основное предназначение подобной конструкции – восприятие значительных комбинированных нагрузок (в том числе двухсторонних осевых) при жесткой фиксации и малых оборотах.

На подшипнике № 3 (рис. 2 – задний подшипник быстроходного вала редуктора) клетки 8 длительный промежуток времени наблюдался высокий уровень виброускорения (порядка $10 m/c^2$), на сопредельном подшипнике № 5 также имеет место повышенный уровень порядка $3 m/c^2$ (рис. 3). Спектральный состав проблемного подшипника показывает (рис. 4), что в спектре доминирует высокочастотная составляющая (на частотах зацепления зубчатой пары силового редуктора и ее гармониках $2,2...10,2$ кГц), а также присутствуют подшипниковые частоты ($0,02...2,2$ кГц), которые смещаются во времени в связи с изменением скорости проката и наличием периодических ударных нагрузок.

На основании данной информации при проведении ближайшего плавного-предупредительного ремонта (ППР) были запланированы следующие ремонтные работы по редуктору:

- проверить состояние рабочих поверхностей зубьев зубчатой пары силового редуктора;

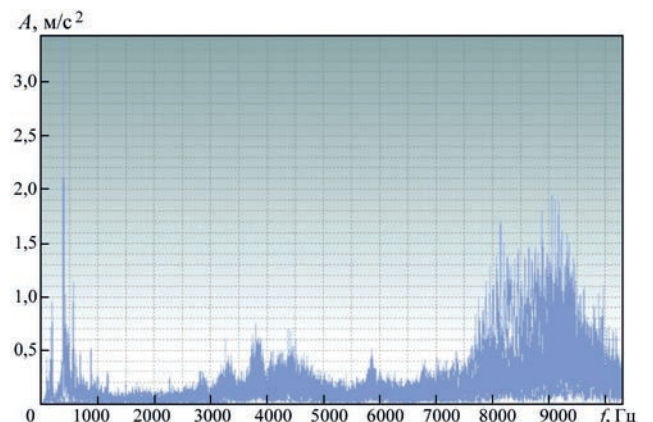


Рис. 4. Спектр виброускорения подшипника № 3 до ремонта. Клеть 8

– вести ревизию подшипника № 3 редуктора.

Результаты ремонтных воздействий. По результатам вскрытия корпуса редуктора был обнаружен дефект роликового двухрядного подшипника № 3: 97773 – повреждение внутреннего дистанционного кольца (рис. 5).

Ввиду ограничения времени на ремонтные воздействия, была произведена замена быстроходного вала редуктора с установкой новых подшипников.

На рис. 3 в таблице представлены средние значения вибрационных параметров до и после выполнения ремонта: как видно из показаний, на подшипниках № 3 и № 5 наблюдается низкий уровень виброускорения порядка 0,57 м/с² и 0,18 м/с² соответственно. Спектр виброускорения на подшипнике № 3 клетки 8 после его замены существенно изменился (рис. 6).

По результатам мониторинга на подшипнике № 5 клетки 6 наблюдается плавный рост виброускорения от 2,6 до 3,04 м/с², при этом значение виброскорости находится в пределах нормы и составляет 0,7 мм/с (рис. 7). В связи с этим была выдана рекомендация ремонтной службе произвести ревизию подшипника № 5 редуктора при проведении ближайшего ППР. В результате осмотра данного подшипника выявлен дефект сепаратора и принято решение о его замене (рис. 8).

После замены подшипника 97770 уровень виброускорения снизился до нормативного значения 0,15 м/с², приоритет – бездефектное эксплуатационное состояние.

Тренд виброускорения подшипника № 5 клетки 6 до технического обслуживания и после замены подшипника, представленный на рис. 9, подтвердил правильность действий.

Тренд виброускорения подшипника № 4 (клеть 4, черновая группа) на рис. 10, указывает на то, что вибросостояние данного узла превышает нормативное значение (ОУ: > 2,8 м/с², пик) и имеет приоритет – требует принятия мер.

При выполнении ревизии подшипника № 4 редуктора клетки 4 был обнаружен проворот подшипника и выполнена его замена, после чего



Рис. 5. Подшипник 97773. Повреждение внутреннего дистанционного кольца. Клеть 8

тренд вибрации фиксирует снижение уровня виброускорения приблизительно в 3 раза (рис. 10).

В системе предусмотрена возможность при необходимости переставлять датчики, устанавливать дополнительные и анализировать их сигналы. В частности, на шестеренных клетях 5 и 8 выполнен монтаж дополнительных датчиков вибрации в аксиальном направлении для контроля осевых нагрузок со стороны ведомого вала ре-

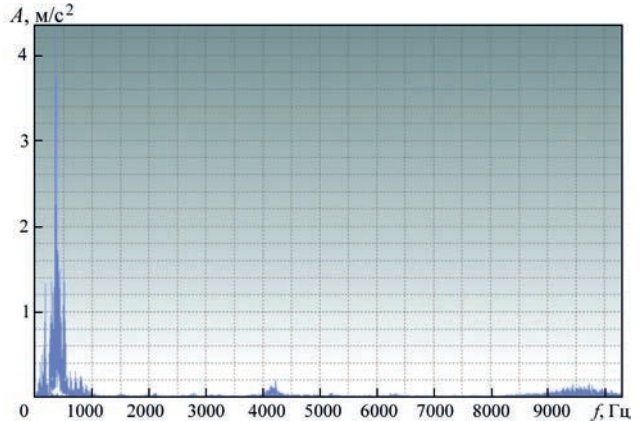


Рис. 6. Спектр виброускорения подшипника № 3 после ремонта. Клеть 8

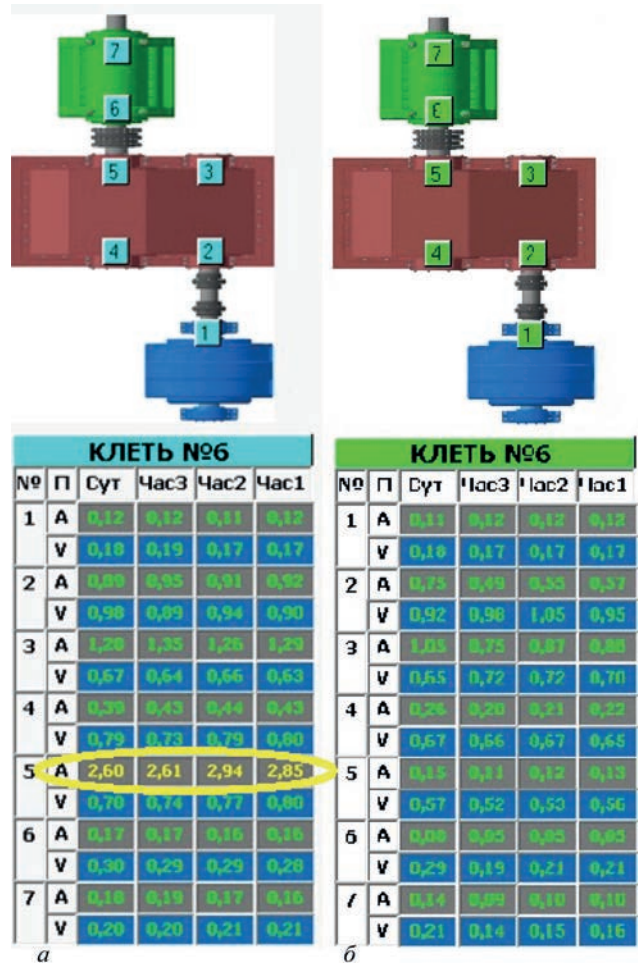


Рис. 7. Вибросостояние узла подшипника № 5 (ОУ: > 2,2 м/с², пик), требует принятия мер. Клеть 6: а – до ремонта; б – после ремонта



Рис. 8. Подшипник 97770. Повреждение сепаратора. Клеть 6

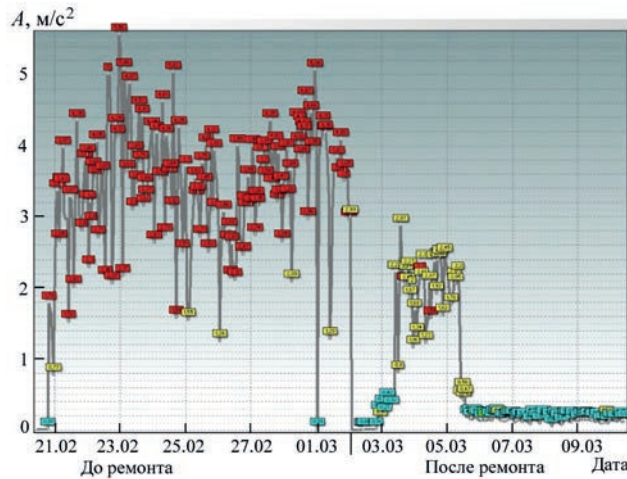


Рис. 9. Тренд виброускорения подшипника № 5 до и после ремонта. Клеть 6, 2018 г.

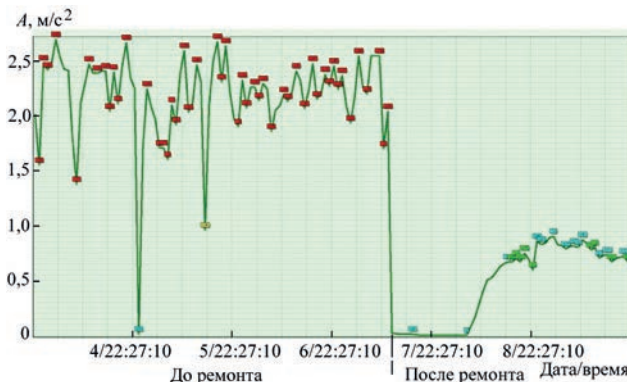


Рис. 10. Тренд виброускорения подшипника № 4 до и после ремонта. Клеть 4, июнь 2018 г.

дуктора. В качестве эксперимента на прокатные стойки клетки 7 установлены дополнительно 4 датчика вибрации для контроля подшипников верхних и нижних пар рабочих и опорных валков. Это позволит определить возможность проведения гарантированного мониторинга и диагностики ответственных узлов валковой системы.

Экономический эффект от внедрения системы «ПРОКАТ» в цехе ЦГПТЛ по результатам превентивных ремонтов силовых редукторов за 7 месяцев эксплуатации, составил половину стоимости затрат на ее приобретение.

Эффективность работы системы дает основание полагать, что затраты на ее дальнейшее развитие и монтаж дополнительных каналов контроля

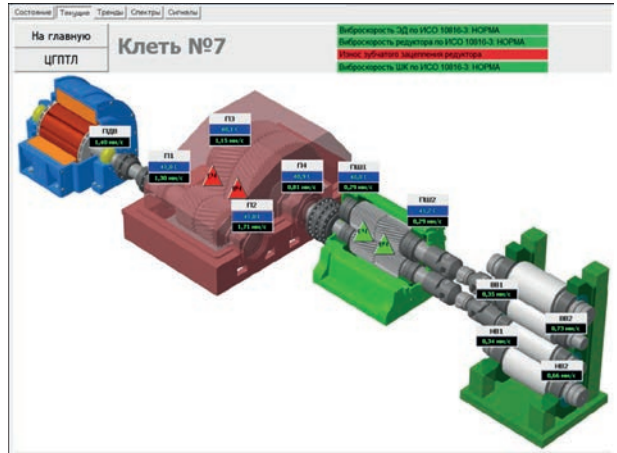


Рис. 11. Клеть 7: визуализация на мониторе АРМ текущих значений вибросостояния клетки по виброскорости (OY, мм/с, СКЗ), температуре подшипников и результатам автоматической диагностики системы

вибрации на стойки прокатных валков, окупятся в кратчайшие сроки и позволят персоналу оперативно следить за техническим состоянием оборудования прокатного стана.

Выводы

1. Система «ПРОКАТ», установленная на всех одиннадцати клетях непрерывного широкополосного стана 1680 выполняет непрерывный мониторинг технического состояния подшипниковых опор, электродвигателей, редукторов, шестеренных клеток и зубчатых зацеплений, распознает зарождающиеся дефекты. Система построена таким образом, что в любой момент времени работы стана обслуживающий и управленческий персонал цеха могут наблюдать значения виброускорения и скорости во всех узлах в рабочем и холостом режимах вращения и в случае необходимости принимать соответствующие решения.

2. Экономический эффект основанный на результатах превентивных ремонтов силовых редукторов за 7 месяцев эксплуатации системы «ПРОКАТ», составил половину стоимости затрат на ее приобретение.

Список литературы

1. Вернев В.В., Большаков Б.И., Путники А.Ю. и др. (2007) *Диагностика и динамика прокатных станов*. Днепропетровск, ИМА-пресс.
2. Вернев В.В., Баглай А.В., Белодеденко С.В. (2018) Особенности вибрационных измерений в прокатных клетях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 43–46.
3. Вернев В.В., Баглай А.В., Белодеденко С.В. (2018) Вопросы вибрационного диагностирования оборудования прокатных станов. *Там же*, 2, 59–62.

References

1. Verenev, V.V., Bolshakov, B.I., Putniki, A.Yu. et al. (2007) *Diagnostics and dynamics of rolling mills*. Dnepropetrovsk, IMA-press [in Russian].

2. Verenev, V.V., Baglai, A.V., Belodedenko, S.V. (2018) Features of vibration measurements in rolling stands. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 43-46 [in Russian].
3. Verenev, V.V., Baglai, A.V., Belodedenko, S.V. (2018) Issues of vibration diagnosis of rolling mill equipment. *Ibid.*, 2, 59-62 [in Russian].

ВІБРАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА РЕДУКТОРА ШИРОКОСМУГОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНУ 1680

А.В. Баглай¹, М.М. Кіпін¹, М.А. Дубіна²

¹ДП «ДІАМЕХ-УКРАЇНА». 61105, м. Харків, вул. Киргизська, 19, АБК-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

²ПАТ «Запоріжсталь». 69008, м. Запоріжжя, Південне шосе, 72

За допомогою впровадженої вібродіагностичної системи у всіх клітках стану 1680 комбінату «Запоріжсталь» виконується контроль технічного стану підшипникових опор електродвигунів, редукторів та шестеренних клітей, а також зубчастих зчеплень. Надано загальні відомості про систему. Наведено перші результати діагностичного аналізу вібраційних сигналів і приклади виявлення дефектів, що зароджуються у підшипниках редуктора клітей 3 і 8, підтвержені подальшим попереджувальним ремонтним впливом. Бібліогр. 3, рис. 11.

Ключові слова: безперервний прокатний стан 1680, гаряча прокатка, система діагностики, вібрація, підшипники, пошкодження

VIBRATIONAL DIAGNOSTICS OF A REDUCER OF WIDE-BAND ROLLING MILL 1680

A.V. Baglai¹, M.M. Kipin¹, M.A. Dubina²

¹SC «DIAMEKH-UKRAINA». ABK-1, 19 Kirgizskaya Str., 61105, Kharkov, Ukraine. E-mail: baglay@diamech.com.ua

²PJSC «Zaporozhstal». 72 Yuzhnoje Rd., 69008, Zaporozhje, Ukraine

The introduced vibrodiagnostic system is used in all the stands of 1680 mill of «Zaporozhstal» works for control of the technical condition of electric motor bearing supports, reducers and gear stands, as well as gearing. General information about the system is provided. The paper gives the first results of diagnostic analysis of vibration signals and examples of detection of initiating defects in bearings of the reducer of stands 3 and 8, which were confirmed by subsequent preventive repair operations. 3 Ref., 11 Fig.

Keywords: continuous rolling mill 1680, hot rolling, diagnostic system, vibration, bearings, damage

Поступила в редакцію
10.12.2018

Конференция-выставка

«НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2019»

Группа компаний «Ассоциация «ОКО» традиционно проводит ежегодную конференцию-выставку «Неразрушающий контроль-2019», которая состоится 15 - 16 мая 2019 г. в Киеве. Конференция нацелена на работу по обмену информацией о достижениях в области средств неразрушающего контроля, методических разработок, а также на определение перспективных путей сотрудничества при создании новой техники и технологий, установление и развитие деловых контактов.

Участникам конференции будут представлены разработки по неразрушающему контролю в следующих отраслях:

- железная дорога (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство);
- атомная и тепловая энергетика;
- нефтегазовая отрасль и трубопроводный транспорт;
- авиастроение и техническое обслуживание летательных аппаратов;
- металлургия;
- машиностроение;
- организация обучения и сертификации персонала по неразрушающему контролю металлов в соответствии с международными стандартами.

На специализированной выставке будут представлены приборы и установки неразрушающего контроля, разработанные и произведенные предприятиями «Ассоциации «ОКО»: НПФ «Ультраконтроль-сервис», НПФ «Промприлад», УкрНИИ НК (Украинский научно-исследовательский институт неразрушающего контроля).

Приглашаем специалистов в области НК посетить конференцию-выставку «Неразрушающий контроль-2019». Участники конференции смогут выступить с сообщениями по актуальным проблемам неразрушающего контроля и принять участие в обсуждении докладов. Участие в данной конференции-выставке будет полезным как для наших постоянных партнеров, так и для тех, кто посетит ее впервые. Это станет началом плодотворного и взаимовыгодного сотрудничества.

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

Больше информации на сайте конференции: www.ndt.com.ua/conf

По вопросам участия просим обращаться в оргкомитет:

Кубрак Лилия Нугзаровна

E-mail: lia-lia_2004@mail.ru

тел./факс: (044) 531-37-27, 531-37-26

тел. моб.: (067) 858-98-53



ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ШАХТ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Э.В. Деменчук, А.В. Чичиков

ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича». 87054, г. Мариуполь, ул. Левченко, 1.
E-mail: eduard.demenchuk@metinvestholding.com

В статье рассмотрены подходы, методы и технологические особенности выполнения теплового контроля кожуха шахт доменных печей. Определены причины образования основных дефектов стенок холодильников печей в процессе их эксплуатации. Описана процедура комплексного неразрушающего контроля, в том числе и тепловизионного, брони шахт доменных печей. Определены преимущества тепловизионной диагностики указанных объектов контроля. Описаны пути и способы устранения выявленных дефектов с применением современных технологии. Библиогр. 3, рис. 8.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, инфракрасный термографический контроль, шахты доменных печей, температура поверхности

В настоящее время тепловой неразрушающий контроль получил существенное распространение на предприятиях Украины. Это связано с появлением компактных и достаточно недорогих тепловизоров на мировом рынке приборов технической диагностики. В ЧАО «ММК им. Ильича» тепловизионный контроль является инструментом эффективного системного обследования и мониторинга оборудования. Тепловизионному контролю подвергается большое количество различного оборудования и объектов.

Особое внимание уделяется агрегатам с жидким металлом (расплавом): металлургическим ковшам, миксерам, конвертерам и доменным печам.

Доменные печи Мариупольского металлургического комбината им. Ильича построены по типовым проектам ГИПРОМЕЗ. Полезный объем, м³: ДП-2 – 1300, ДП-3 – 2000, ДП-4 – 2002, ДП-5 – 2300. Все доменные печи имеют островное расположение в плане цеха. Нижняя и верхняя лещады, горн, фурменная зона, заплечики и марагор охлаждаются поясом плитовых холодильников. Плитовой холодильник представляет собой чугунную плиту с залитыми в ней толстостенными стальными трубами – змеевиками, по которым циркулирует техническая вода. $\frac{1}{3}$ верхней части шахты печи неохлаждаемая, $\frac{2}{3}$ нижней части шахты, где зона высоких температур, охлаждается холодильными плитами – картами собственной конструкции. Карта (рис. 1) представляет собой продольный фрагмент брони шахты печи, в который врезаны толстостенные трубы длиной 500 мм.

Снаружи эти трубы в виде вертикального контура соединены «калачами». Карта с внутренней стороны заливается огнеупорным бетоном. Охлаждаются холодильники шахты в основном си-

стемой испарительного охлаждения (СИО), но возможно охлаждение технической водой [1]. СИО включает 2 секции по 92 контура охлаждения в каждой. Контроль теплового состояния кожуха шахты печей осуществляется термомпарами и датчиками. Для замера теплосъема и температуры холодильников установлено:

- 120 термомпар температуры тела холодильников;

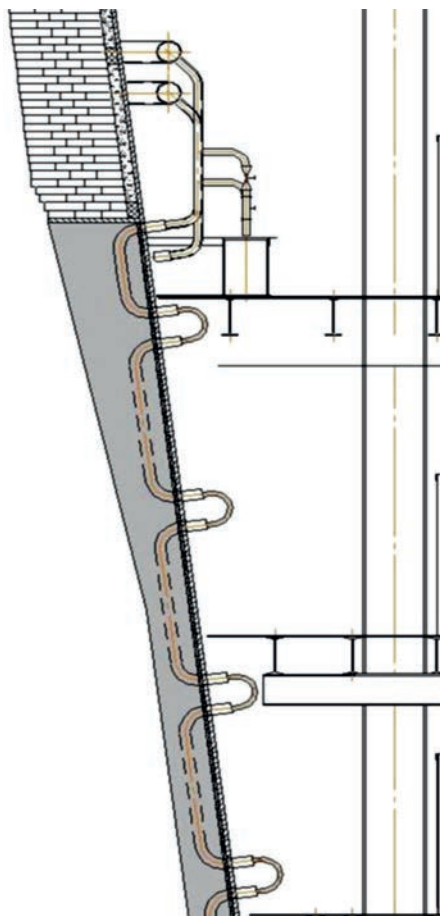


Рис. 1. Фрагмент холодильных плит (карта) в броне шахты

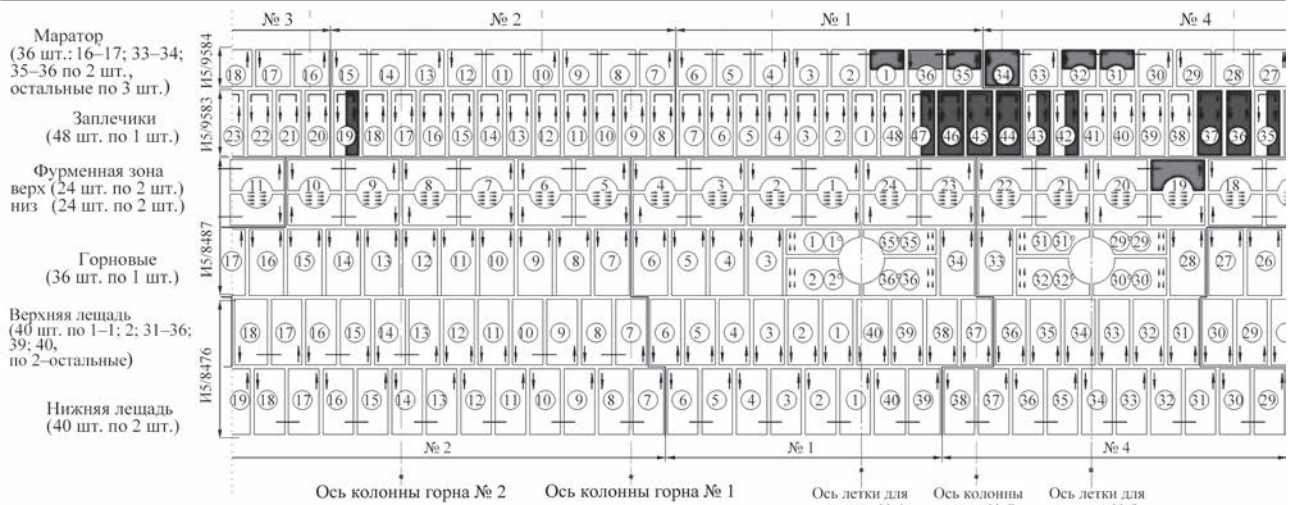


Рис. 2. Фрагмент карты визуализации состояния элементов САО

• 8 датчиков давления на напорной и исходящей воде.

Производятся измерения:

- 100 точек измерения температуры отходящей воды;
- 100 точек измерения температуры расхода воды;
- 4 точки измерения входящей воды.

Служба обслуживания САО ежемесячно контролирует работу систем охлаждения шахты печей [1]. На рис. 2 представлен фрагмент карты визуализации состояния САО. На карте красным цветом выделяются системы, которые выведены аварийно из работы, голубым цветом обозначают поверхности брони, которые охлаждаются наружными холодильными устройствами (коробами) с подводом технической воды.

Интенсификация доменного процесса сопровождается повышением нагрузок на стенки доменной печи. Рост тепловых нагрузок на холодильники печи является причиной их преждевременного выхода из строя и последующего отключения от охлаждения. Локальные перегревы шахт и применение внешнего охлаждения этих участков водой является причиной значительного роста напряжений по толщине кожуха, что сопровождается его деформацией и трещинообразованием. Это требует

поиска решений по контролю состояния кожуха печи и его защите для увеличения стойкости и межремонтного периода в работе агрегата [2].

Так на доменных печах ЧАО «ММКИ» специалисты Управления надежности и диагностики (УНиД) выполняют следующие виды контроля: визуальный, тепловизионный, ультразвуковой (толщинометрия).

Тепловизионный контроль брони шахт доменных печей специалисты УНиД проводят с 2013 г. Изначально тепловизионный контроль выполнялся дистанционно, без подъема на шахту. Съемка тепловизором проводилась удаленно с зоны расположения фурменных приборов. При такой съемке тепловизором со значительной дистанции главной проблемой являются помехи, которые создают различные металлоконструкции, закрывающие видимый доступ к поверхностям кожуха (брони) в следующих зонах: шахта, распар, горн, верхняя лещадь. Металлоконструкции закрывают до 50 % всех поверхностей (рис. 3).

Поэтому съемка зон кожуха шахты работающей печи на расстоянии 15...20 м неэффективна, а полученные термограммы (рис. 4) неинформативны и сложны в идентификации дефектов.

В настоящее время тепловизионный контроль выполняется специалистами УНиД с помощью



Рис. 3. Металлоконструкции и элементы САО участка шахты печи

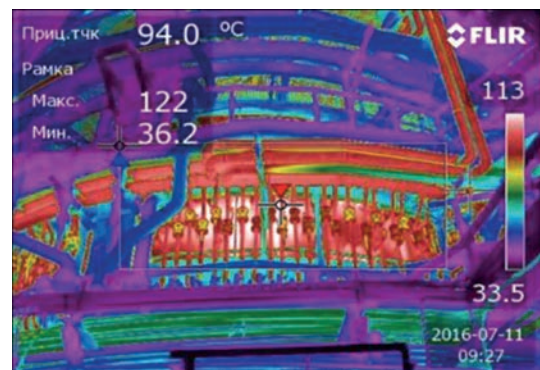


Рис. 4. Термограмма участка шахты печи

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

переносных тепловизоров FLIR (USA) (рис. 5) по всем отметкам (площадкам) печи (рис. 6).

Такая диагностика объективна, информативна, экономична и удобна, ее преимущества:

- измерение температуры поверхностей бесконтактным способом;
- достоверность, объективность и точность получаемых сведений;
- безопасность при проведении обследования оборудования;
- большой объем выполняемых работ за единицу времени;
- предотвращения аварий и повреждений;
- возможность определения дефектов на ранней стадии развития;
- возможность составления прогнозов о состоянии агрегата.

Обследование проводится после перехода печи в режим «тихого хода», когда остановлена загрузка сырья в печь и прекращено горячее дутье в печь (воздухонагреватели не в работе). Концентрации монооксида углерода (CO) в этот момент

по шахте минимальны и не требуется применение ГЗА (газозащитной аппаратуры). При этом достаточно временного промежутка в 2 ч для обследования поверхностей кожуха шахты печи диагностами совместно с цеховым персоналом. По итогам обследования составляется отчет (рис. 7) по техническому обслуживанию (термометрии) шахты доменной печи (ДП).

На основании технологической инструкции «Ремонт и эксплуатация кожухов доменных печей, воздухонагревателей и трактов горячего дутья» приняты пороговые значения температур для оценки технического состояния футеровки. Пункт 2.3 данной инструкции информирует: «При повышении температуры кожухов доменных печей, и воздухонагревателей выше 150 °С и кожухов воздухо-



Рис. 5. Тепловизор FLIR T620 (USA)

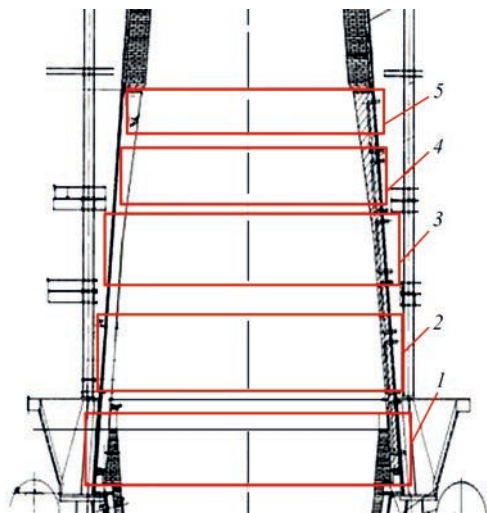


Рис. 6. Схема диагностируемых зон шахты: 1 – площадка № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5

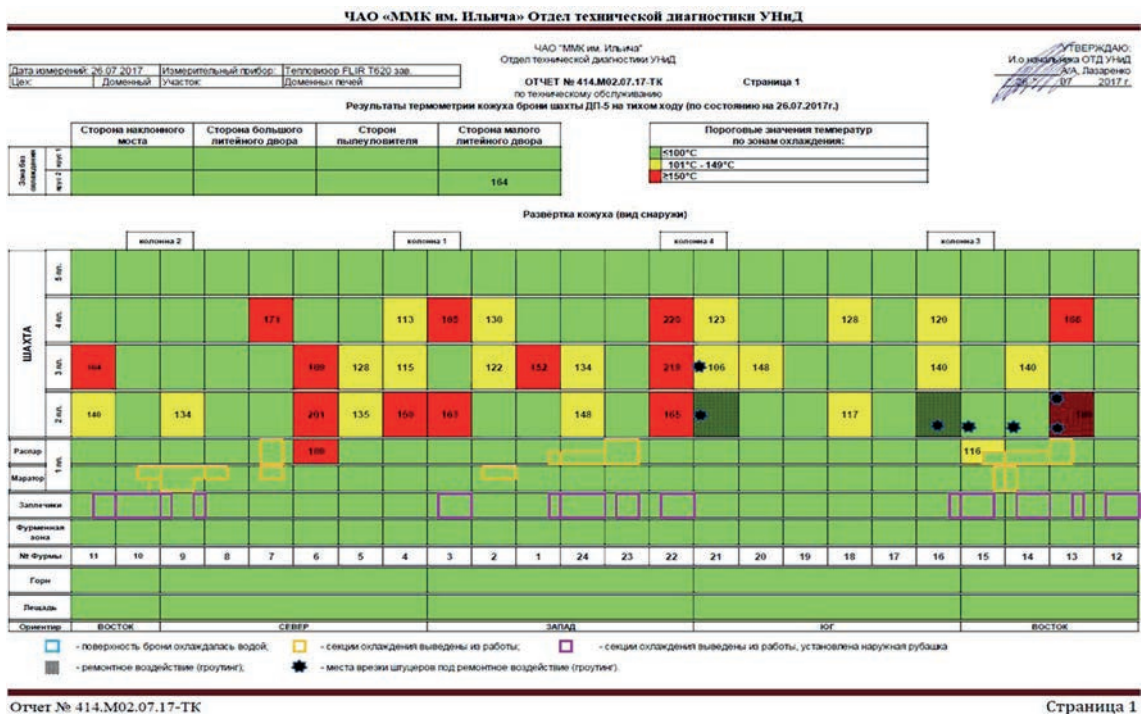


Рис. 7. Развернутая схема кожуха шахты в отчете по термографии

проводов горячего дутья выше 200 °С немедленно принять меры к ее снижению и устранению причин перегрева» [3]. На основании выполненного отчета выставляется оценка состояния футеровки: «Норма», «Тревога», «Стоп». В систему SAP вносится оценка технического состояния оборудования (технического места) с прикреплением сформированного отчета в формате PDF. Специалистами цеха и специалистами УНиД проводится анализ состояния футеровки ДП и принимается решение о ремонтных воздействиях на футеровку. На рис.8 представлен тепловой тренд диагностируемых зон печи.

При переходе доменной печи в режим «тихого хода» выполняются следующие работы: используется технология и оборудование для закачки быстротвердеющих огнеупорных материалов (гроутинг) за броню печи и за холодильники печи для восстановления изношенной футеровки и заполнения пустот, которые образовались за годы эксплуатации между броней и холодильниками, холодильниками и изношенными участками футеровки. Такие работы позволяют значительно снизить тепловые (термические) воздействия на кожух шахты печи. Поэтому руководством цеха постоянно формируется график ремонтных воздействий (гроутинга) футеровки печей на последующий месяц.

В настоящее время специалистами ММКИ применяются современные технологии ремонта и поддержания печи в работоспособном состоянии — это торкретирование или шоткретирование шахты, промывка элементов охлаждения специальными растворами на основе поверхностно-активных веществ, периодическая загрузка титаносодержащих материалов в печь. Технология шоткретирования позволяет под воздействием сжатого воздуха на футеровку шахты печи плотным слоем нанести огнеупорный бетон на базе карбида кремния (спрейкаст). Спрейкаст характеризуется прекрасными физическими свойствами и более устойчив к воздействию шихты по сравнению с традиционной огнеупорной футеровкой. К тому же, если на футеровку огнеупорными материалами уходит около месяца, то для шоткретирования достаточно и трех суток. Такая технология применяется в доменном цехе с 2012 г. На доменных печах № 3 и № 4 шоткретирование позволило снизить расход кокса на тонну чугуна. Оценить эффективность выполнения восстановительных ремонтных работ, а также состояние футеровки позволяет применение теплового контроля, в том числе термографии.

В заключение хотелось бы отметить, что тепловизионный контроль является наиболее прогрессивным методом неразрушающего контроля на предприятиях горно-металлургического

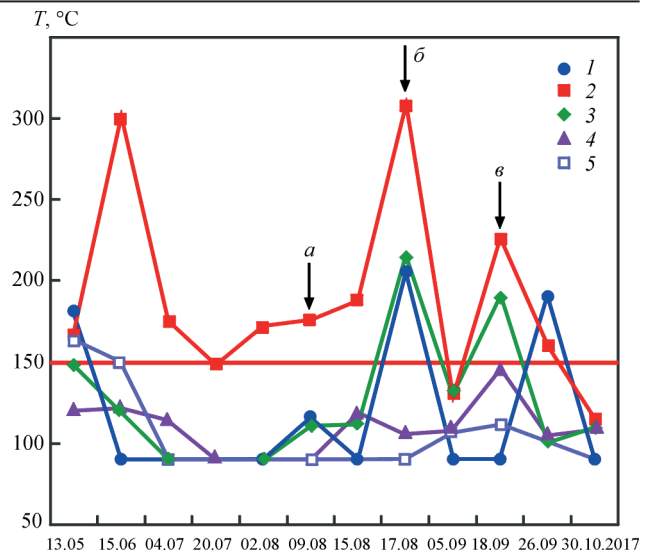


Рис 8. Тепловой тренд диагностируемых зон кожуха шахты ДП-3 (период: 13.05.2017 – 30.10.2017): 1 – площадка № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5. Максимально допустимый нагрев 150 °С. Гроутинг: а – 09.08.17; б – 17.08; в – 26.08

комплекса. Он ставит перед специалистами по диагностике все новые задачи и цели. Его преимущества в сравнении с другими методами и способами измерения температур неоспоримы.

Выводы

1. Локальные перегревы шахт и применение внешнего охлаждения этих участков водой является причиной значительного роста напряжений по толщине кожуха, что сопровождается его деформацией и трещинообразованием.

2. Применение комплексной, в том числе и тепловизионной диагностики, и ее выполнение по всем отметкам (площадкам) печи, позволяет повысить эффективность и информативность метода, упростить идентификацию дефектов.

3. В случае тепловизионного контроля, отбраковка кожухов доменных печей выполняется согласно технологической инструкции «Ремонт и эксплуатация кожухов доменных печей, воздухонагревателей и трактов горячего дутья».

4. Для определения результатов ремонтных работ целесообразно применять тепловизионный контроль.

Список литературы

- (1997) *Правила безопасности в доменном производстве. ДНАОП 1.2.10-1.02-97 (НПАОП 27.1-1.02-97)*.
- Чеченев В.А. (1999) *Прогнозирование живучести элементов кожуха шахты доменной печи*. Днепропетровск.
- (1987) *Ремонт и эксплуатация кожухов доменных печей, воздухонагревателей и трактов горячего дутья. Технологическая инструкция*. Днепропетровск, ВНИИ Мехчермет.

References

- (1997) *Safety rules for blast furnace production. DNAOP 1.2.10-1.02-97 (NPAOP 27.1-1.02-97)* [in Russian].

2. Chechenev, V.A. (1999) *Prediction of viability of blast furnace casing elements*. Dnepropetrovsk [in Russian].
3. (1987) *Repair and operation of blast furnace casings, air heaters and hot blast paths*. Technological manual. Dnepropetrovsk, VNIИ Mekhchermet [in Russian].

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ ШАХТ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Е.В. Деменчук, А.В. Чичиков

ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча». 87054, м. Маріуполь, вул. Левченко, 1.
E-mail: eduard.demenchuk@metinvestholding.com

У статті розглянуто підходи, методи та технологічні особливості виконання теплового контролю кожуха шахт доменних печей. Визначено причини утворення основних дефектів стінок холодильників печей в процесі їх експлуатації. Описано процедуру комплексного неруйнівного контролю, в тому числі і тепловізійного, броні шахт доменних печей. Визначено переваги тепловізійної діагностики зазначених об'єктів контролю. Описано шляхи і способи усунення виявлених дефектів із застосуванням сучасних технологій. Бібліогр. 3, рис. 8.

Ключові слова: неруйнівний контроль, інфрачервоний термографічний контроль, шахти доменних печей, температура поверхні

FEATURES OF THERMAL CONTROL OF BLAST FURNACE SHAFTS

E.V.Demenchuk, A.V.Chichikov

PJSC «Illyich Iron and Steel Works of Mariupol». 1 Levchenko Str., 87054, Mariupol, Ukraine.
E-mail: eduard.demenchuk@metinvestholding.com

The paper deals with the approaches, methods and technological features of conducting thermal control of the casing of blast furnace shafts. The causes for formation of the main defects in furnace cooler walls during operation are established. Procedure of comprehensive nondestructive testing, including thermal imaging, of blast furnace armour, is described. Advantages of TV diagnostics of the above-mentioned objects of control are determined. Ways and methods of elimination of the found defects with application of modern technologies are described. 3 Ref., 8 Fig.

Keywords: nondestructive testing, infrared thermographic testing, blast furnace shafts, surface temperature.

Поступила в редакцію
05.02.2019

Подписка – 2019 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/
Подписной индекс 74475

Украина		Зарубежные страны	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
330 грн.	660 грн.	30 евро	60 евро
В стоимость включена доставка заказной бандеролью			



Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств ДП «Преса», «АС-Медіа», «ПресЦентр Киев», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий».

Правила для авторов, лицензионное соглашение и архивные выпуски журналов на сайте издательства
www.patonpublishinghouse.com

В 2019 г. в открытом доступе выпуски журналов 2003–2017 гг. в формате PDF.

Контакты:

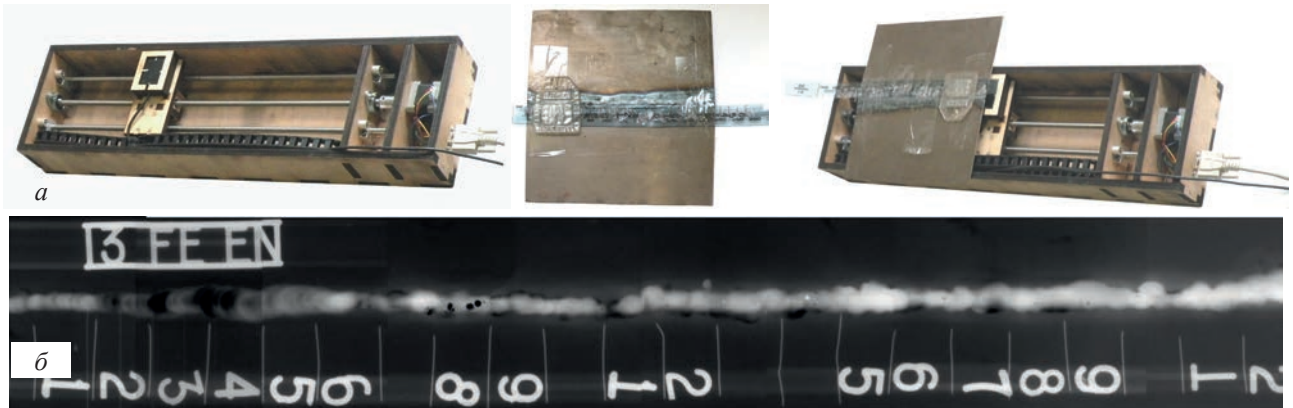
Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 06.03.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
Печать ООО «ДИА».
03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

КАЛЕНДАР ВИСТАВОК ТА КОНФЕРЕНЦІЙ У 2019 р.

Дата	Місце проведення	Подія
9-11 квітня	Львів, Україна ВЦ «Південний-ЕКСПО»	IX Спеціалізована виставка «Метал. Обладнання. Інструмент»
25-26 квітня	Астана, Казахстан	Международная выставка и конференция технологий и оборудования для неразрушающего контроля
25-27 квітня	Глазго, Велика Британія	16 th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management (CM 2019)
2-4 травня	Hyderabad, India	6 th NDT-EXPO 2019
13-14 травня	Київ, Україна Асоціація «ОКО»	Конференція «Неразрушающий контроль – 2019»
22-23 травня	Prague, Czech Republic	3 rd International Conference on Diagnostics of Structures and Components Using Metal Magnetic Memory Method (MMM 2019)
22-24 травня	Астана, Казахстан	5-я Международная выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» - NDT Kazakhstan 2019
28-31 травня	с. Репіно, Санкт-Петербург, РФ	XXIII Петербургская конференция «Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов» УЗДМ 2019
3-6 червня	Львів, Україна	6-а Міжнародна конференція «Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity»
5-7 червня	Metz, France	2 nd International Congress on Welding, Additive Manufacturing and associated non-destructive testing
12-14 червня	Vitoria-Gasteiz, Spain	14 th Spanish AEND Conference (AEND 2019)
17-21 червня	Созополь, Болгарія	34-а Національна конференція з міжнародною участю «Defectosopia'2019» в рамках «NDT Days 2019»
18-20 червня	Edmonton, Canada	NDT in Canada 2019
24-26 червня	Бордо, Франція,	12 th International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF12)
2-4 липня	Фюрт, Німеччина	International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography
14-18 липня	Портланд, Орегон, США	46 th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation – QNDE 2019
4-5 вересня	Новосибірськ, РФ	20-я Международная специализированная выставка приборов и оборудования для промышленного НК — ДЕФЕКТОСКОПИЯ-2019/ NDT Novosibirsk
17-19 вересня	Portoroz, Slovenia	15 th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials
17-20 вересня	смт. Маньківка, Черкаська обл., Україна	III Науково-технічна конференція з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі»
7-9 жовтня	Prague, Czech Republic	10 th International Workshop NDT in Progress 2019
20-25 жовтня	Mexico City, Mexico	Pan-American Conference for Nondestructive Testing (PANNDT VI)
22-24 жовтня	Москва, РФ	19-я Международная выставка оборудования для неразрушающего контроля и технической диагностики / NDT Russia
5-8 листопада	Guangzhou, China	World Conference on Acoustic Emission-2019 (WCAE-2019)
13-15 листопада	Paris-Saclay, France	11 th International Symposium on NDT in Aerospace 2019
18-21 листопада	Лас-Вегас, Невада, США	Щорічна конференція ASNT 2019
19-22 листопада	Київ, Україна МВЦ	Науково-технічний семінар «Сучасні технології неруйнівного контролю та їх застосування в промисловості» під час проведення XVIII Міжнародного промислового форуму – 2019
5-7 грудня	Bangalore, India	NDE 2019 - Conference and Exhibition on Non-Destructive Evaluation

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ МІНІАТЮРНИХ ТВЕРДОТІЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ



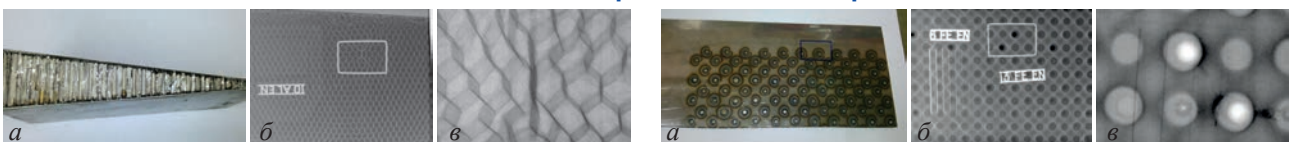
Отримання повного безплівкового зображення протяжних ділянок виробів з високою роздільною здатністю з окремих фрагментів:
а – фрагменти пристрою; б – дефектограма протяжного зварного шва

Контроль газопровідних труб, будівельної арматури та інших виробів



1 – джерело радіаційного випромінювання; 2 – мініатюрний твердотільний перетворювач;
3 – блок передачі цифрових зображень; 4 – передача зображень на екран монітора

Комбіновані технології радіаційного контролю



а – розріз сотової конструкції; б – зображення, отримане методом контактної зйомки; в – збільшення зображення дефектної області, отримане за технологією X-ray mini

а – зовнішній вигляд зразка; б – рентгівське зображення зразка, отримане методом контактної зйомки; в – збільшення зображення дефектної області, отримане за технологією X-ray mini

Переваги контролю з використанням мініатюрних твердотільних перетворювачів

1. Безпосереднє перетворення радіаційного випромінювання у цифрове зображення в електронному вигляді з передачею результатів на екран монітору, або планшета у реальному часі.
2. Відсутність проміжних операцій, що характерні для плівкової радіографії.
3. Можливість зміни параметрів експозиції під час проведення контролю.
4. Можливість «зшивання» окремих фрагментів зображення у повну картину протяжної контрольованої ділянки.
5. Можливість проведення контролю у важкодоступних зонах агрегатів, машин та конструкцій.
6. Значна економія часу та коштів.
7. Портативність обладнання.
8. Забезпечення НК виробів, що наразі не контролюються, в тому числі труби малого діаметру, арматура.
9. Створення технологій зі збільшенням зображення внутрішніх дефектів до 10 разів, без видимих втрат в роздільній здатності.

E-mail: office@paton.kiev.ua