

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

О. И. Бойчук, Э. Ф. Гарф,

Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,

Л. М. Лобанов, З. А. Майдан (отв. секр.),

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.), **Ю. Н. Посыпайко,**

В. А. Троицкий (зам. гл. ред.), **Е. В. Шаповалов**

(ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина)

В. А. Сtryжало

(Ин-т проблем прочности, Киев, Украина)

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

В. Л. Венгринович

Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Казакевич

Ин-т физической химии, Киев, Украина

О. М. Карпаш

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

В. В. Ключев

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин

(Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина)

Н. В. Новиков

Ин-т сверхтвердых материалов, Киев, Украина

Г. И. Прокопенко

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

С. К. Фомичев

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

М. Г. Чаусов

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

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150, ул. Боженко, 11

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

Редакторы

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета, Т. В. Юштина

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А. Особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов 3

ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., РОЗЫНКА Г. Ф., МИЛЕНИН А. С., ПИВТОРАК Н. И. Вероятностная оценка состояния трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами утонения 12

ДЯДИН В. П. Связь между удельными работами разрушения стандартных ударных образцов с различными радиусами закругления в переходной области температур 19

ГЛУХОВСКИЙ В. Ю. Применение тепловизионной диагностики для контроля качества паяных соединений статорных обмоток электродвигателей 23

НИКОЛАЕВ В. В. Характер зміни напружено-деформованого стану трубопроводу в місці встановлення підсилюючих муфт 27

РЕМНЕВА В. В., ПОГРЕБНЯК И. Ф., ШАРКО А. В. Исследование методов сегментации радиографических снимков сварных соединений 33

ПОВСТЯНОЙ О. Ю., РУДЬ В. Д., МЕЛЬНИК Ю. А., ІМБІРОВИЧ Н. Ю. Аналіз сучасних методів визначення структури та топології поверхонь матеріалів 37

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ТРОИЦКИЙ В. А., БОРОДАВКО М. В., ДЯДИН В. П., ДАВЫДОВ Е. А., КАРМАНОВ М. Н. Обследование трубчатых металлоконструкций элементов каркаса вытяжной трубы Чернобыльской АЭС 43

БОРЯК К. Ф., ВОЛКОВ С. Л., ШПАТ Е. С. Перспективы внедрения температурного мониторинга для диагностики технического состояния механических узлов подвижного тягового железнодорожного состава 50

СИДОРОВ В. А., СУШКО А. Е., ДЕМИН Е. М. Практика реализации стационарной системы вибродиагностики прокатного оборудования на примере комплекса «КОРУНД» 54

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

20-я Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю 63

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

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

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

E. V. Shapovalov
 (PWI of the NASU, Kiev, Ukraine)

V. A. Stryzhalo
 (Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine)

N. P. Aleshin
 N.E.Bauman MSTU, Moscow, RF

V. L. Vengrinovich
 Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus

L. M. Kazakevich
 Institute of Physical-Chemistry, Kiev, Ukraine

O. M. Karpash
 Ivano-Frankovsk National Technical Institute of Oil
 and Gas, Ukraine

V. V. Kluev
 CJOSC NIIIB MNPO «Spektr», Moscow, RF

Z. T. Nazarchuk, V. N. Uchanin
 (Physico-Mechanical Institute, Lvov, Ukraine)

N. V. Novikov
 Institute for Superhard Materials, Kiev, Ukraine

G. I. Prokopenko
 Institute of Metal Physics, Kiev, Ukraine

V. A. Storozhenko
 Kharkov National University of Radioelectronics,
 Ukraine

S. F. Fomichev
 KPI National Technical University of Ukraine, Kiev

M. G. Chausov
 National University of Bioresources and Nature
 Management of Ukraine, Kiev

V. E. Sherbinin
 IMF UrD RAS, Ekaterinburg, RF

Address

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

Scientific editors

E. A. Davydov, L. F. Kharchenko

Editors

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

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

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

CONTENTS

SCIENTIFIC-TECHNICAL

NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A. Features
 of application of acoustic emission method at destructive
 testing of materials..... 3

VELIKOIVANENKO E. A., ROZYNKA G. F., MILENIN A. S.,
PIVTORAK N. I. Probabilistic estimate of the condition of
 pipeline elements with detected thinning defects..... 12

DYADIN V. P. Connection between specific work of fracture
 of standard impact samples with different rounding-off radii
 in the transition temperature range 19

GLUKHOVSKII V. Yu. Application of thermal imaging diag-
 nostics to monitor the quality of soldered joints of electric
 motor stator windings 23

NIKOLAEV V. V. Nature of variation of pipeline stress-strain
 state in the area of mounting the reinforcing couplings 27

REMNEVA V. V., POGREBNYAK I. F., SHARKO A. V.
 Investigation of the methods of segmentation of welded joint
 radiographs 33

POVSTYANOJ O. Yu., RUD' V. D., MELNIK Yu. A.,
IMBIROVICH N. Yu. Analysis of modern methods of deter-
 mination of the structure and topology of material surface 37

INDUSTRIAL

TROITSKII V. A., BORODAVKO M. V., DYADIN V. P.,
DADYDOV E. A., KARMANOV M. N. Examination of tubular
 metal structures of frame elements of Chernobyl NPP veni-
 lation pipe 43

BORYAK K. F., VOLKOV S. L., SHPATE S. Prospects for
 introduction of temperature monitoring for diagnostics of
 technical condition of mechanical components of railway
 traction electrical equipment 50

SIDOROV V. A., SUSHKO A. E., DEMIN E. M. Practical
 experience of implementation of a stationary vibrodiagnostic
 system of rolling equipment in the case of «KORUND» complex.... 54

NEWS AND INFORMATION

20th All-Russia Scientific-Technical Conference on NDT 63

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic



НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

Освещены некоторые особенности контроля разрушения материалов конструкций с применением метода акустической эмиссии. Рассмотрены возможные причины формирования поля повреждений на ранних стадиях деформирования. Показано, что высокая чувствительность метода АЭ и связанная с этим регистрация накапливающихся в процессе разрушения повреждений, в том числе на микроуровне, может привести к неоднозначным заключениям о состоянии материала. Приведены результаты испытаний образцов из материалов в состоянии поставки и отработавших значительный срок при эксплуатации конструкций. На примере кратковременных испытаний образцов и непрерывного мониторинга действующих конструкций показано, что влияние эффекта Кайзера на общую картину распределения АЭ событий не всегда может быть выявлено. Сделан акцент на необходимости учета выявленных особенностей при контроле промышленных конструкций. Библиогр. 19, рис. 7.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, разрушение материалов, эффект Кайзера

Успешная эксплуатация диагностических систем на основе акустической эмиссии (АЭ) позволяет расширить область их применения в сторону управления процессом контроля и эксплуатацией оборудования, производящим основной продукт предприятий. При этом предъявляются более высокие требования к контролирующему оборудованию и его программному обеспечению, что требует более детального изучения и интерпретации АЭ, возникающей в процессе разрушения. Представляемая статья является фрагментом этой большой работы и посвящена исследованию некоторых особенностей регистрации разрушения материалов с использованием явления АЭ.

Известно, что поставляемые на изготовление сварных конструкций материалы имеют начальные дефекты. Последующая сборка элементов конструкции вносит свои дефекты, связанные с особенностями технологии сборки. Как правило, большинство дефектов в процессе освоения конструкции выявляются контролем и исправляются. Часть из них может быть незамечена в начале эксплуатации, но затем проявляется и исправляется. Это макродефекты, они обнаруживаются существующими методами контроля. Следует также отметить, что значительные коэффициенты запасов прочности, устанавливаемые разработчиками конструкций, в большинстве случаев снимают

на определенный период эксплуатации проблему, связанную с негативным влиянием оставшихся, не выявленных при контроле дефектов.

Рассмотрим дефекты на микроуровне, которые трудно определить, с одной стороны, из-за сложности методик такого контроля, а с другой – из-за того, что они практически не влияют на несущую способность конструкции в момент ее испытаний и сдачи в эксплуатацию и операции по их выявлению теряют практический смысл.

В состоянии поставки элементов конструкций на сборку подавляющее большинство дефектов, находящихся на микроуровне, по данным исследователей составляет от 10^6 1/см³ и выше [1]. Количество дефектов связано с видом материала, способом его изготовления, способом изготовления конструкции, условиями ее эксплуатации. При эксплуатации готовой конструкции происходят необратимые изменения в структуре материала, связанные с физико-химическими процессами, протекающими в нем под воздействием внешних условий и эксплуатационной нагрузки. Дефекты развиваются, в устье образующихся микротрещин накапливаются пластические деформации, сами трещины соединяются и это приводит с течением времени к постепенному старению материала, главным признаком которого является его охрупчивание (рис. 1). К такой картине приводит,

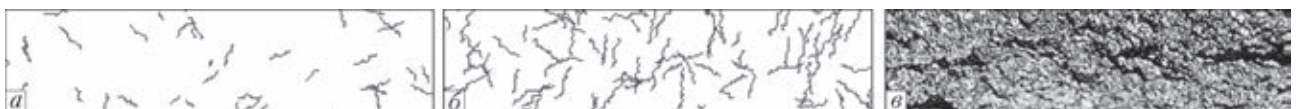


Рис. 1. Схема развития микротрещин в поперечном сечении пластины в результате действия растворенных газов: а, б – два среза по времени (размеры трещин для наглядности увеличены); в – поверхность разрушенного при испытании на ударную вязкость образца из материала трубы (сталь типа 09Г2С) газопровода после 48 лет эксплуатации (x6)

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, 2014



например, механизм трансформации водорода на поверхности микротрещины. Как известно, атом водорода свободно перемещается внутри атомной решетки, имея размеры меньшие, чем межатомное расстояние. В то же время такие атомы, попадая в микротрещину и обмениваясь энергией с ее поверхностью, приобретают структуру молекул, имеющих значительно большие размеры и меньшую подвижность. Внутри микротрещины создаются громадные давления – от 10^3 до 10^4 МПа [2, 3]. Это приводит к ее подрастанию, вследствие которого внутреннее давление падает, а затем процесс повторяется. Кроме того, молекулярный водород является веществом поверхностно-активным, что приводит к снижению величины энергии разрыва межатомных связей. Микродефекты заполняют практически весь объем конструкции. Концентрация напряжений в устье трещинок приводит к появлению микропластических деформаций.

Процессы старения материалов являются достаточно длительными и могут протекать десятки лет. Таким образом, наличие микродефектов в материалах можно представить как «мину замедленного действия», которая может сработать спустя 20...30 и более лет после начала эксплуатации конструкции. Сказанное подтверждают исследования, показывающие, что механические свойства материалов изменяются с течением времени [4, 5]. При этом величина потерь в свойствах зависит от условий эксплуатации конструкций и внешней среды, в которой протекает эксплуатация.

Существенным механизмом накопления повреждений в материалах конструкций в процессе эксплуатации является также механизм, связанный с перемещением и группированием дислокаций под воздействием внешних усилий. Исследования показывают, что образование зон пластических деформаций за счет перемещения групп дислокаций приводит к образованию микротрещин и связанной с ними микропластичностью, появляющуюся в устье трещин [6–14]. Такие групповые перемещения становятся чувствительными для современной АЭ аппаратуры и вполне достаточны для того, чтобы регистрировать процесс разрушения материалов уже на уровне дислокационных перемещений [11, 15]. Так, появление межкристаллитных трещин при растяжении затвердевающего металла достаточно надежно обнаруживается с помощью АЭ [12].

Применение АЭ технологии имеет свои особенности, связанные с необходимостью выделения степени опасности процессов, протекающих в материале, по данным АЭ. Сигналы АЭ регистрируются практически во всем диапазоне накопления повреждений в материале – от уровня перемещения групп дислокаций до формирования и

развития макро- и магистральных трещин. Характеристики же сигналов изменяются в зависимости от объемов и интенсивности протекающих в материалах процессов разрушения.

В общем случае разрушение материалов по данным АЭ может быть схематически представлено четырьмя стадиями.

1. На первой стадии состояние материала характеризуется равномерными, неодновременными для всей поверхности конструкции вспышками сигналов АЭ, показывающими развитие микродефектов, хаотически заполняющих объем конструкции. Их развитие вызвано действием внешних нагрузок и внутренних физико-химических процессов, протекающих в материале в основном за счет накопления в микротрещинах блуждающих в материале газов, таких как водород, азот и др. (рис. 1). АЭ отслеживает эти процессы отдельными импульсами, возникающими в местах разрушения микродефектов. Это хорошо иллюстрирует рис. 2, в нижней части которого показаны некластеризованные импульсы АЭ, возникающие сразу же с началом растяжения образца по всей его длине.

2. На второй стадии появляются области, где микродефекты по тем или иным причинам развиваются более интенсивно. В этих областях параметры АЭ соответственно изменяют свои значения, становясь более характерными для данного этапа разрушения. Образующиеся кластеры групп событий АЭ дают представление о состоянии материала и местах наиболее интенсивных процессов разрушения на этой стадии.

3. На третьей стадии в некоторых из областей накопившиеся микродефекты переходят в макродефекты и кластеры событий АЭ в полном соответствии с этим приобретают другие информационные параметры. Появляются уточненные места предполагаемого разрушения и подсчитывается прогнозная разрушающая нагрузка.

4. На четвертой стадии появляются области, где происходит достаточно быстрое слияние дефектов, образуются развивающиеся трещины. В этом случае АЭ информация приобретает критическое значение, характеризуя начало и развитие разрушения. Выделяется, как правило, один кластер, характеризующий место разрушения (рис. 2).

В зависимости от величины и опасности начальных дефектов в эксплуатируемой конструкции последовательность наступления той или иной стадии разрушения может быть различной.

Механизм разрушения материалов с применением АЭ метода рассматривался многими учеными. В то же время следует отметить, что результаты таких исследований в сильной мере зависят от применяемой АЭ аппаратуры, ее чувствительно-



Рис. 2. Распределение сигналов АЭ по длине образца при испытаниях растяжением. В нижней части графика представлено распределение сигналов АЭ без кластеризации

сти и возможностей по обработке и анализу АЭ информации. Глубина исследований в этом направлении тесно связана с разрешающей способностью АЭ аппаратуры и возможностями ее программного обеспечения, позволяющего проводить анализ состояния материала по данным АЭ. В последнее время компьютерные технологии, в том числе программное обеспечение АЭ систем, бурно развиваются. Разработанная на базе последних достижений в компьютерных технологиях АЭ аппаратура ЕМА 3.9 отличается большими возможностями с точки зрения получения и анализа АЭ информации [4]. Возможность фиксировать, помимо АЭ, также и другие параметры, связанные с разрушением материалов, расширили ее применение в сторону увеличения анализа характерных их комбинаций. Появились средства и технология для более детального сопоставления при контроле работоспособности конструкций показаний АЭ с теми разрушающими процессами, которые происходят в материале при его деформировании.

Следует также отметить, что протекающая в материалах коррозия, наряду с отмеченными

выше процессами, часто приводит к снижению несущей способности конструкций за счет изменения рабочих сечений несущих элементов и появления микро- и макротрещин. Дефекты такого рода при их развитии также фиксируются при помощи метода АЭ. В то же время фактор коррозии может быть существенно уменьшен за счет выполнения профилактических работ, а нормативные запасы прочности и последующий регулярный контроль резко уменьшают влияние этого фактора. Для анализа процесса накопления повреждений были проведены исследования разрушения образцов из различных сталей с анализом их АЭ активности на различных стадиях разрушения. Разрушение образцов выполнялось растяжением в стандартной разрывной машине Р20.

Четыре АЭ датчика устанавливались непосредственно на образце, как показано на рис. 3, и позволяли определять параметры АЭ сигналов и координаты их возникновения. Как показали исследования, АЭ сигналы возникали в самом начале растяжения образцов по всей их длине и распределялись неравномерно. Для отслеживания процесса разрушения выполнялась кластеризация сигналов АЭ, как показано на рис. 2 в верхней его части. Кластеризация позволяла выявить общую закономерность развития разрушения с указанием более наглядного места развивающегося процесса. Кроме того, кластеризация событий АЭ позволяла запустить алгоритм прогнозирования места разрушения образца и разрушающей нагрузки. На рис. 3 представлены виды образцов для АЭ испытаний, гладкие и сварные образцы изготавливались в соответствии с ТУ-025АЭ-1986.

Анализируя результаты испытаний образцов из стали 20 в состоянии поставки, представленных на рис. 4, можно отметить, что с ростом нагрузки неравномерно растет и количество АЭ событий. Амплитуда этих событий также неравномерна, что указывает на различную интенсивность разрушения в процессе растяжения образца. Суммарное количество накапливаемых повреждений растет (зеленая кривая).

Следует также отметить, что величина времени нарастания события АЭ до своего максимального значения (Rt) постепенно уменьшается по мере роста нагрузки. Последнее свидетельствует о постепенном упрочнении материала образца и преобладании хрупкой составляющей в его разрушении. В конечной части разрушения число событий АЭ невелико, что позволяет сделать вывод о слиянии микро- и макродефектов и постепенного образования разрушающей трещины [4].

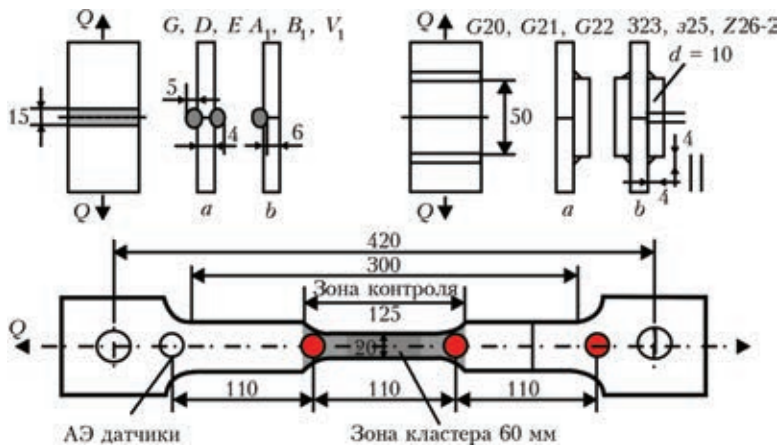


Рис. 3. Образцы для исследования влияния сварки и видов сварных соединений на акустические характеристики материалов. Материал соединения – сталь 17ГС; $\delta = 8$; сварка ручная; режим сварки $I = 210 \dots 220$ А; электрод УОНИ-13/45

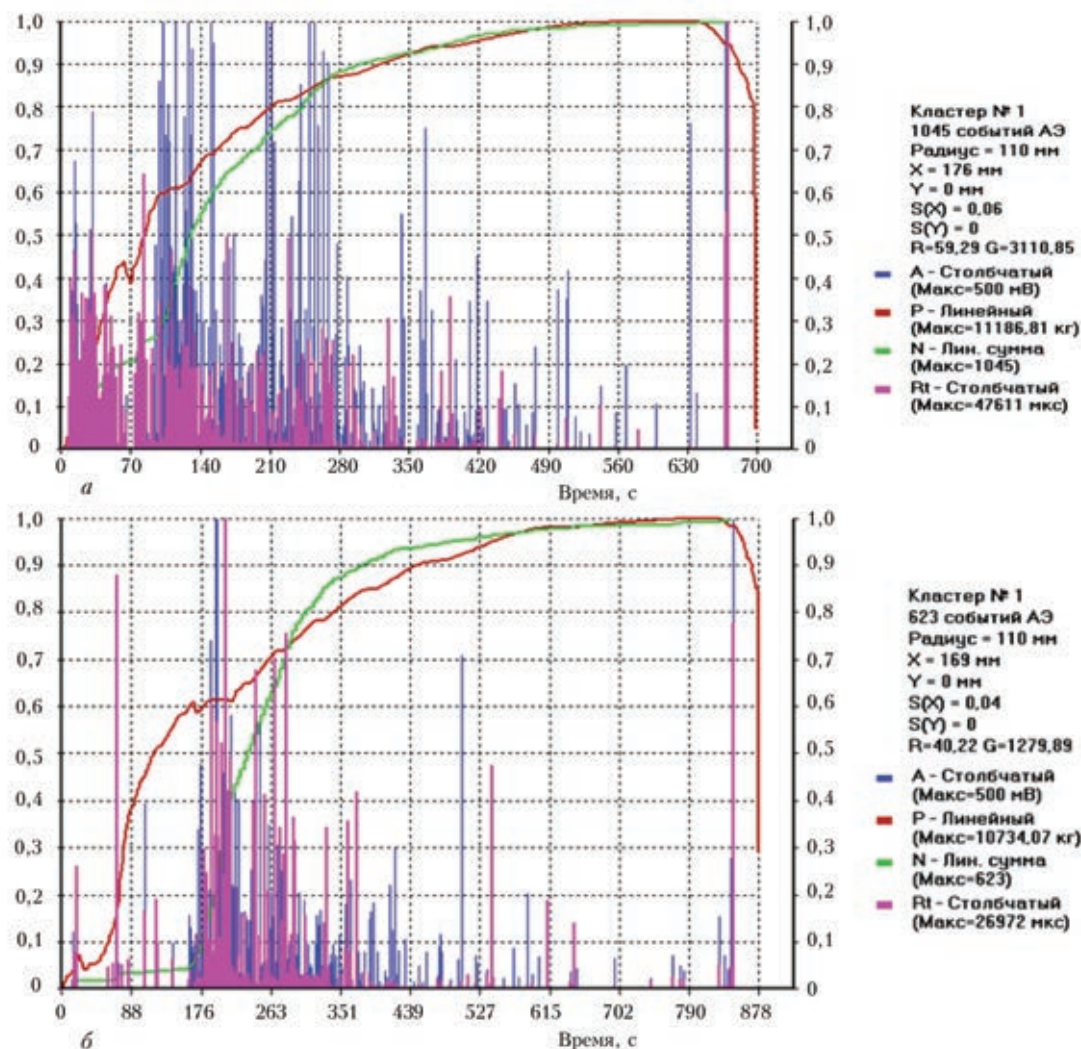


Рис. 4. Результаты испытаний на растяжение образцов из стали 20 в состоянии поставки (а) и после эксплуатации трубы газопровода из этого материала в течение 32 лет (б): А – амплитуда сигналов АЭ; Р – нагрузка, кг; N – суммарное число событий АЭ на каждом этапе нагружения; R_t – «крайс тайм» – время нарастания АЭ сигнала до максимального значения; справа приведены параметры каждого измерения: радиус кластера, в котором собирались события АЭ; координата места разрушения и погрешность определения координаты места разрушения $S(X)$, а также значения измеренных величин

На рис. 4, б показано разрушение образца из той же стали после длительной эксплуатации в трубе газопровода (32 года). Первое, на что следует обратить внимание, это незначительное по сравнению с материалом без наработки количество АЭ событий в начальной фазе нагружения, в данном случае вплоть до нагрузки, равной 0,6 разрушающей. В качестве причины этого факта можно, в частности, предположить действие эффекта Кайзера: рабочее давление в газопроводе в какой-то момент времени соответствовало нагрузке, при которой все дефекты, имевшиеся на тот момент в материале трубы, развились. Дальнейшее развитие дефектов, согласно Кайзеру, начинается только при более высоких нагрузках, чем максимальная зарегистрированная для данного трубопровода, о чем и свидетельствует график рис. 4, б. В то же время видно, что все-таки имеется небольшое количество АЭ событий и при меньшей нагрузке, чем 0,6 разрушающей. Это

свидетельствует о том, что в процессе эксплуатации появлялись новые дефекты, а длительная рабочая нагрузка не превышала ту, которая привела к срабатыванию эффекта Кайзера в дефектах, появившихся до новообразованных. При дальнейшем нагружении образца с превышением предельной для данной трубы рабочей нагрузки картина изменения параметров АЭ подобна приведенной на рис. 4, а.

В некоторых случаях эффект Кайзера может быть слабо выражен или вообще неразличим. Это происходит тогда, когда процессы трещинообразования в материале в процессе его эксплуатации протекают более интенсивно, благодаря неблагоприятным внешним и внутренним условиям, и становятся доминирующими в процессе разрушения. Так, испытания некоторых сталей, эксплуатирующихся в условиях неблагоприятных с точки зрения образования микродефектов и их роста, показывают результаты, где эффект Кайзе-

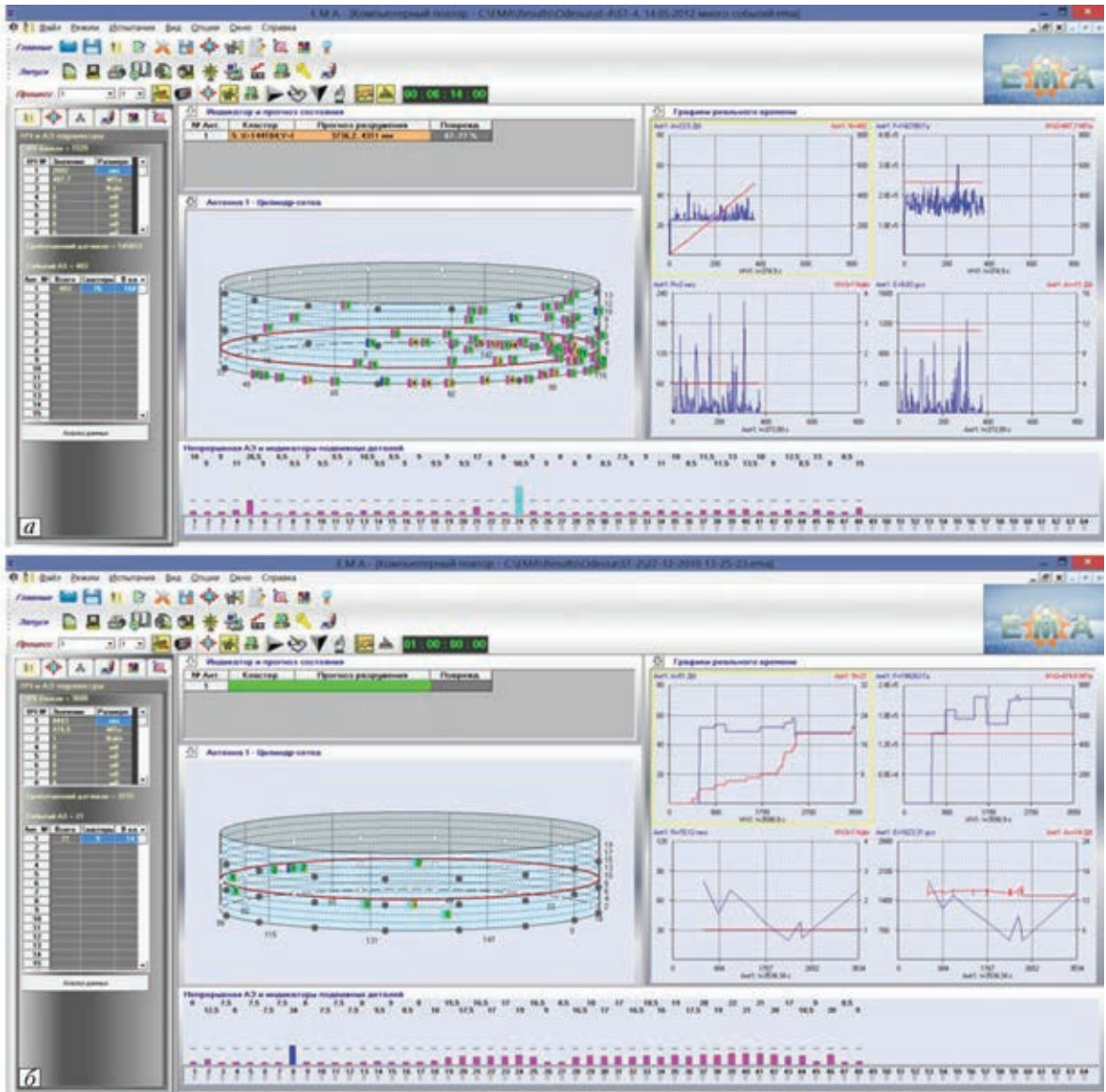


Рис. 6. Резервуар, наполненный жидкостью до уровня 7,5 м, контролируемая поверхность 3500 м². Показано окно программы диагностической АЭ аппаратуры ЕМА 3.9 в момент очередного наблюдения. На цилиндрической поверхности резервуара видны АЭ события, зарегистрированные в данный момент времени (а). В следующий момент времени картина АЭ событий изменилась (б). Красной линией показан уровень налива жидкости

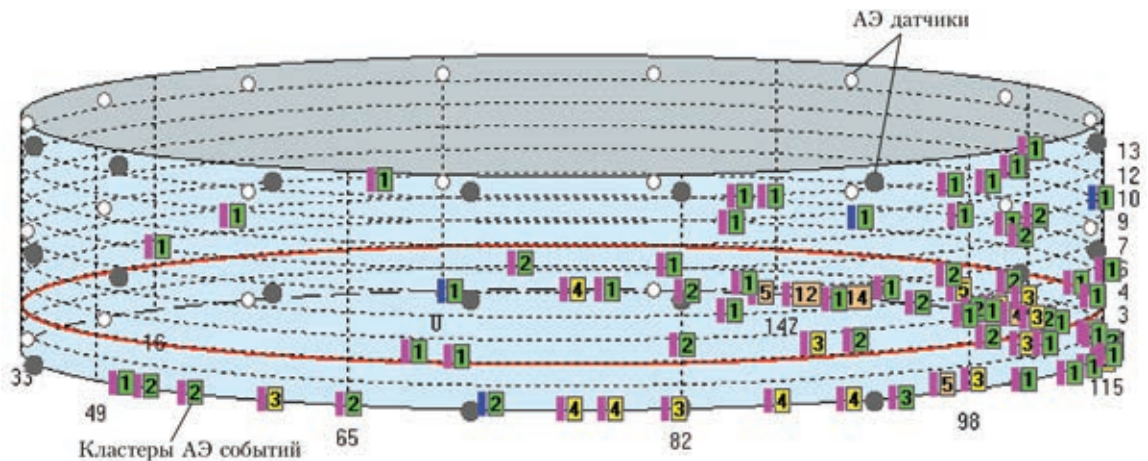


Рис. 7. Схематическое изображение боковой поверхности хранилища, представленного на рис. 6, а. Прямоугольниками с флажками показаны места расположения кластеров АЭ событий, возникших в данный момент времени. На флажках указано число событий в данном кластере. Цвет флажка условно градуирован по степени опасности от зеленого (не опасного) до красного. Цифрами по горизонтали указаны координаты по окружности хранилища, по вертикали с правой стороны – высота в метрах, красной линией – уровень налива (на рис. 6, б обозначения те же)



УОНИ-13/45. Режим сварки – ток $I = 210 \dots 220$ А (сталь толщиной 8 мм). Сварка встык выполнялась с неполным проплавлением, что оставляло в средней части по толщине пластины зазор величиной 4 мм (рис. 3, образцы *G, D, E*). Для сварных соединений были взяты пластины, вырезанные из труб газопровода, проработавшего 36 лет. Как и для большинства металлов, проработавших определенное количество лет, в данном случае наблюдается значительно меньшее количество АЭ событий до вполне определенного момента, когда, очевидно, перестал действовать эффект Кайзера и АЭ стала фиксироваться в полном соответствии с активностью развивающихся дефектов. Следует также отметить, что АЭ события в рассматриваемом случае отличаются от событий в сплошных образцах. Это объясняется как наличием собственно сварного шва, так и наличием концентратора – сварного соединения. Проведенные эксперименты со сварными швами с небольшим тепловложением не позволили полностью восстановить упругие свойства металла после длительной эксплуатации, что и привело к частичному срабатыванию эффекта Кайзера. Распределение АЭ событий отражает суммарную картину воздействия на данный материал наработки и сварки.

Процесс разрушения конструкций интенсифицируют также остаточные напряжения, всегда имеющиеся в сварных конструкциях. Следует отметить неоднородность распределения остаточных напряжений, особенно в области сварного соединения. Изменения в структуре шва и околошовной зоны, возникающие при сварке, приводят к изменению размеров кристаллов в районе шва. Межкристаллитное проскальзывание приводит к перераспределению напряжений первого рода за счет появления напряжений второго рода, связанных с движением кристаллов. Существенное искажение поля напряжений в районе сварного шва негативно отражается на развитии микроразрушения в металле.

Сказанное выше позволяет сделать акцент на некоторых практических вопросах АЭ контроля. В частности, анализируя проведенные исследования, можно сделать ошибочное предположение, что достаточно исключить регистрацию первого этапа разрушения ввиду его незначительности, чтобы алгоритм оценки состояния материала не был искажен большим количеством «малозначащей» информации. Однако на практике ситуация обстоит иначе. Несмотря на то, что разрушение на микроуровне очень часто замедляется и развитие трещин останавливается, все же нет уверенности в том, что процесс не возобновится именно в местах появления первичных очагов разрушения, особенно после длительного периода эксплуатации. Появление этих очагов должно служить

объектом внимания контролера, места появления АЭ активности должны быть зафиксированы, их следует учитывать при общем анализе работоспособности конструкции. Данная особенность была замечена, в частности, при контроле резервуаров для хранения жидких продуктов.

Каждый контролируемый участок материала конструкции имеет индивидуальные акустические свойства, в связи с чем обычная статистическая обработка информации затруднена. Для оценки состояния материала по данным АЭ требуется кластерный анализ, объединяющий разрозненные в пространстве и времени события АЭ по некоторым заданным признакам, и индивидуальная обработка информации из каждого кластера. Особенно важно это для сильно зашумленных промышленных объектов, где акустический фон от действия оборудования может достигать уровня сигналов АЭ или даже превышать его.

Эффект прекращения АЭ в материалах при повторном нагружении (эффект Кайзера) во многих случаях на практике в чистом виде не проявляется. Эта особенность требует разработки специальных алгоритмов обработки информации для распознавания реального хода процесса разрушения материала. Здесь, помимо электронных средств выделения полезного сигнала из общего потока АЭ информации, все более актуальными становятся математические методы обработки АЭ данных, основанные как на анализе отдельных информативных параметров сигналов АЭ, так и на укрупненной оценке получаемой информационной картины в целом с применением разнообразных статистических методов или распознавания.

При контроле материала действующих конструкций методом АЭ периодически возникают ситуации, когда на основании текущей информации трудно сделать вывод о работоспособности материала, тем более оценить ее с точки зрения влияния на несущую способность конструкции спустя некоторое время. Это связано, в первую очередь, со вторичными процессами по отношению к основным процессам разрушения, протекающим в материалах от действия рабочих нагрузок. Например, на рис. 6 представлены два момента контроля крупногабаритного резервуара для хранения жидких продуктов. В первом случае (рис. 6, *a*), акустическая активность достаточно высока. Видны кластеры различных уровней предупреждения, разбросанные по всей поверхности резервуара (контролируемая поверхность более 3000 м²) – от зеленого до красного. Однако следует отметить, что данная картина являлась временной, характеризующей лишь ситуацию, сложившуюся в данный момент времени. Как было сказано выше, чувствительность аппаратуры достаточно высока и позволяет регистрировать



АЭ события при микроперемещениях в развитии дефектов. Уже в следующий момент времени картина может резко измениться. Так, на рис. 6, б события АЭ исчезли, а общий показатель уровня опасности приобрел допустимый зеленый цвет, в верхней части окна над схемой корпуса резервуара видна зеленая полоса индикатора опасности, показывающая, что резервуар работает в нормальном, штатном режиме.

Для эффективного анализа таких ситуаций с точки зрения их влияния на кратковременную и долговременную несущую способность конструкций требуется обеспечить ряд необходимых условий, к которым относятся:

- быстродействующая и высокочувствительная аппаратура АЭ контроля;
- программное обеспечение, реализующее в реальном времени фильтрацию, кластеризацию, кратковременный и долговременный статистический анализ получаемых данных;
- база данных по акустическим свойствам материала конструкции;
- накопление данных по АЭ активности конструкции, опасным местам и возникновению критических ситуаций в процессе непрерывного мониторинга конструкции;
- разработка и использование математических методов многопараметрического анализа данных в условиях нестационарных случайных процессов и при наличии помех.

Системы АЭ контроля, обеспечивающие большую часть приведенных выше условий, в настоящее время созданы и постоянно совершенствуются прежде всего с точки зрения обработки, анализа и интерпретации получаемых данных. На рис. 6 справа информационное окно последней версии диагностической системы ЕМА 3.9. Аппаратура и программное обеспечение используют новейшие достижения в области АЭ технологии, в области исследований разрушения материалов с применением метода АЭ, в компьютерных технологиях [7, 8, 15].

Показательным является окно программы в процессе непрерывного мониторинга резервуара. В центральной части окна показана схема контролируемого резервуара, на боковой поверхности которого в процессе эксплуатации отражаются все АЭ события в принятом для классификации опасности цвете. Цвета приняты от зеленого – «не опасно» до красного – наивысшая степень опасности.

В правой части окна отображена в графической форме мгновенная, соответствующая данному моменту времени информация по основным параметрам контроля. В верхнюю часть окна выведены основные параметры, управляющие отображением и обработкой информации. Левая часть окна позволяет оператору получить

дополнительную информацию о параметрах контроля в процессе его выполнения. На схеме резервуара черными точками показаны места установки АЭ датчиков.

Простота управления режимами контроля и в то же время достаточно полный охват основных функций управления позволяют сравнительно легко освоить работу этой техники и получать на практике удовлетворительные результаты, вплоть до прогнозирования разрушающей нагрузки и остаточного ресурса материала конструкций.

Отметим также, что непрерывное получение и анализ АЭ информации, оценка состояния материалов в реальном времени, предупреждение об опасности, накопление статистических данных и расчет ресурса конструкций осуществляются системами мониторинга в полностью автоматическом режиме, и после первоначальной настройки в процессе запуска уже не требуют вмешательства человека в свою работу [16]. В процессе мониторинга происходит набор данных, который позволяет со временем детальнее учитывать многие из рассмотренных в данной статье вопросов и повышать, таким образом, точность оценки состояния материалов по данным АЭ.

Выводы

Дефекты структуры материалов, по данным АЭ исследований [1-7, 9-14, 19] начинают формироваться на микроуровне, как правило, за счет перемещения групп дислокаций и внутренних физико-химических процессов, непрерывно протекающих в металлах. Микротрещины и поры постепенно растут, образуя сеть, в результате чего пластические свойства материала постепенно изменяются.

АЭ информация, связанная с перемещением дислокаций, не всегда свидетельствует о критическом состоянии материала, например, в случае, когда развитие трещин в материале блокируется его пластическими свойствами. Процессы разрушения на микроуровне при этом протекают незначительный период времени. В дальнейшем АЭ информация может исчезнуть с информационного экрана или резко уменьшиться, показывая, что развитие зарегистрированных ранее дефектов замедлилось или остановилось. В то же время область появления этой информации, ее количественные характеристики могут быть исходными показателями при оценке возможности последующего с течением времени разрушения в этой области.

При одинаковых условиях нагружения распределение АЭ событий в материале того же самого объекта неравномерно и в каждой точке контроля различно. Для двух различных объектов одинаковой конфигурации, находящихся в аналогичных температурно-силовых условиях, также



характерно отличие АЭ картины. Данное явление, вероятнее всего, объясняется разницей в полях имеющихся и развивающихся повреждений. Соответственно, логично предположить, что при полностью идентичных полях повреждений и температурно-силовых условий будет зарегистрирована идентичная картина АЭ в материале.

Возникающий в материалах эффект прекращения АЭ при повторном нагружении (эффект Кайзера), во многих случаях на практике «в чистом виде» не проявляется. Для распознавания реального хода процесса разрушения материала с учетом эффекта Кайзера необходима разработка специальных методик и алгоритмов обработки информации.

Рассмотренные особенности формирования АЭ событий при разрушении образцов растяжением свидетельствуют о необходимости разработки специфических алгоритмов и программ для их анализа и учета в основном алгоритме контроля состояния материала с тем, чтобы можно было выделить на фоне значительного количества АЭ информации ту, которая наилучшим способом может характеризовать развивающиеся в материале процессы.

Для получения более полной АЭ информации, возникающей при разрушении материалов, целесообразно наряду с лабораторными исследованиями выполнять также исследования при непрерывном мониторинге эксплуатирующихся конструкций.

1. Ионов В. Н., Селиванов В. В. Динамика разрушения деформируемого тела. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
2. Смилян О. Д. Распространение водорода в зоне деформационных трещин // Журн. физ. химии. – 1980. – 54, № 11. – С. 2913–2917.
3. Оценка состояния материалов с использованием метода акустической эмиссии. Перспективы и проблемы / Е. В. Черняева, Д. И. Галкин, Д. Л. Мерсон и др. // Дефектоскопия. – 2013. – № 3. – С. 3–14.
4. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. – Киев: Индпром, 2012. – 312 с.
5. Сыромятникова А. С. Деградация физико-механического состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях низких клима-

тических температур // Тр. VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. 24–29 июня 2013 г. (к 75-летию акад. В. П. Ларионова). – Т.2. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2013. – 332 с. – С. 38–44.

6. Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Партон В. З. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: Т. 1. Основы механики разрушения. – Киев: Наук. думка, 1988. – 488 с.
7. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 5. – Київ: Наук. думка, 2001. – 1134 с.
8. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
9. Скальський В. Р., Сімакович О. Г. Експериментальна акустико-емісійна оцінка зародження мікротріщин // Техн. діагностика і неразруш. контроль. – 2013. – № 1. – С. 35–38.
10. Broek D. Some contributions of electron fractography to the theory of fracture// International metallurgical reviews. – 1974. – 19. – P. 135–182.
11. Terelman A. S., Chow R. Acoustic emission testing and microcracking processes / American society for testing and materials. 1972. – Library of congress catalog card number; 72-75896. – P. 30–40.
12. Matsushita A., Endo I., Yoshida M. Criteria of solidification cracking of Al–Mg and Al–Si alloys by acoustic emission method // J. of the Japan institute of light metals. – 2012. – 62, № 3. – P. 104–108.
13. Frederick J. R., Felbeck D. K. Dislocation motion as a source of acoustic emission: American society for testing and materials. – 1972. Library of congress catalog card number; 72-75896. – P. 129–139.
14. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emissions\\ i bid. 72-75896. – P. 20–29.
15. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. – № 2. – С. 5–19.
16. Десятирічний досвід впровадження безперервного акустико-емісійного моніторингу сховищ аміаку Одеського припортового заводу / О. С. Васильев, А. А. Грузд, А. О. Йолкін и др. // Хім. пром-сть України. – 2012. – № 3. – С. 43–51.
17. Недосека С. А. К стандартизации применения XML (extenseve markup language) в автоматизированных системах АЭ диагностики // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2005. – № 2. – С. 9–16.
18. Скальський В. Р., Андрейків О. Є., Сергієнко О. М. Оцінка водневої пошкодженості матеріалів за амплітудами сигналів акустичної емісії // Там само. – 1999. – № 1. – С. 17–27.
19. Недосека А. Я., Недосека С. А. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) // Там же. – 2010. – № 2. – С. 7–17.

The paper highlights some features of monitoring structure material fracture with application of acoustic emission method. Possible reasons for formation of damage field at early deformation stages are considered. It is shown that the high sensitivity of AE method and the associated recording of damage accumulated during fracture, in particular on microlevel, may lead to unambiguous conclusions on material state. Results of testing samples from materials in as-delivered conditions and after a considerable period of operation in structure service are given. Example of short-time testing of samples and continuous monitoring of structures in service is used to show that the influence of Keiser effect on the overall pattern of AE event distribution cannot always be revealed. The need to allow for the revealed features in monitoring industrial facilities is emphasized. 19 References, 7 Figures.

Key words: acoustic emission, materials fracture, Keiser effect

*Поступила в редакцию
25.10.2013*

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОБНАРУЖЕННЫМИ ДЕФЕКТАМИ УТОНЕНИЯ

Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, Г. Ф. РОЗЫНКА, А. С. МИЛЕНИН, Н. И. ПИВТОРАК

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

Разработана и реализована методика численного анализа предельного состояния трубопроводных элементов с поверхностными геометрическими аномалиями типа локальной коррозионной потери металла с учетом вероятностного характера разрушения конструкций в сложном напряженно-деформированном состоянии исходя из предположения о преимущественно вязком механизме разрушения при этом. На примере элементов морских магистральных трубопроводов с дефектами различного размера были определены вероятностные параметры разрушения и исследованы особенности влияния различной степени поврежденности на несущую способность дефектных конструкций. Показана универсальность предложенного подхода, позволяющего с использованием современных методов численного анализа напряженно-деформированного состояния проводить необходимые расчеты вероятности аварийной ситуации на ответственных промышленных объектах. Библиогр. 17, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: трубопровод, локальная потеря металла, предельное состояние, вязкое разрушение, вероятность аварийной ситуации, параметры Вейбулла

Диагностика технического состояния сварных трубопроводов и сосудов давления, работающих при существенных внешних нагрузках и в условиях агрессивных сред, является ключевым аспектом гарантирования их безопасной эксплуатации [1–3]. Так как области применения таких конструкций (атомная и тепловая энергетика, трубопроводный транспорт) предполагают высокие требования к их долгосрочной надежности, важным является точное определение предельного состояния исходя из известной степени эксплуатационной поврежденности, к которой прежде всего следует отнести локальные поверхностные коррозионные потери металла [4]. Возникающие при этом трехмерные геометрические аномалии являются концентраторами напряжений, в результате чего предельная эксплуатационная нагрузка и соответствующий коэффициент запаса прочности конструкции могут выйти за пределы допустимых значений, определяемых требованиями актуальных нормативных документов [5, 6]. Характерными толстостенными конструкциями такого типа являются морские магистральные трубопроводы (ММТ), давление в которых может достигать 10...25 МПа. При этом наличие агрессивных сред как с внешней стороны трубопровода (морская вода), так и с внутренней (транспортируемые углеводороды с остаточной влагой и жидкой фазой), наряду с естественными трудностями при ремонтно-восстановительных работах на больших глубинах определяет необходимость минимально консервативных оценок допустимости фактического и прогнозируемого состояний дефектных участков ММТ.

Снижение консервативности анализа состояния рассматриваемых конструкций в сравнении с актуальными отечественными и зарубежными нормативными документами может быть достигнуто, в частности, минимальной схематизацией фактической геометрии участка трубопровода с обнаруженными дефектами, прогнозированием процессов разрушения с учетом фактических характеристик металла, моделированием напряженно-деформированного состояния в области геометрических аномалий. Кроме того, могут быть использованы вероятностные подходы оценки работоспособности конструкций как для описания стохастического характера зарождения разрушения, так и для учета требований риск-анализа в комплексе мероприятий по обеспечению безопасности промышленных объектов [7].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма вероятностной оценки состояния элементов трубопроводных систем с дефектами локального утонения стенок, основанного на численном анализе предельного состояния дефектной конструкции с учетом характерных механизмов разрушения.

Нарушение сплошности металла конструкции под действием внешнего силового нагружения в общем случае инициируется на локальных структурных или физико-химических неоднородностях материала. Численный анализ такого состояния должен учитывать различие пространственных масштабов процессов разрушения (микроуровень) и кинетики полей напряжений и деформаций под действием эксплуатационных нагрузок (макроуровень). Одним из подходов, позволяю-



щих описать процесс зарождения разрушения конструктивных элементов в неравномерном поле механических напряжений, является вероятностный метод расчета по принципу слабого звена. В этом случае предполагается, что вероятность p_i потери несущей способности конструкции в конкретной небольшой области (в которой значение градиента напряжений невелико) описывается трехпараметрической функцией Вейбулла [8, 9]:

$$p_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \right], \sigma_1 > A, \quad (1)$$

где σ_1 – главные напряжения; A, B, m – параметры Вейбулла.

Интегрирование всего поля напряжений по площади S самого слабого поперечного сечения позволяет определить суммарную вероятность разрушения конструкции p исходя из следующего соотношения:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \frac{dS}{S_0} \right], \sigma_1 > A, \quad (2)$$

где S_0 – константа материала, характеризующая пространственный масштаб перехода микроповреждений в макродефект.

Точность количественной оценки вероятности согласно выражению (2) зависит от адекватности используемых коэффициентов Вейбулла конкретной задаче. Соответственно, определение значений A, B, m может базироваться либо на статистическом анализе данных большого количества экспериментов по разрушению идентичного материала, либо на численном исследовании предельного состояния конструкции по результатам ее технической диагностики. Второй подход является менее трудоемким, хотя и более консервативным с точки зрения границ применимости численных методов определения напряженно-деформированного и предельного состояний дефектной конструкции с учетом развития ее эксплуатационной поврежденности различной природы.

Характерным механизмом разрушения толстостенных трубопроводов из высокопрочных сталей в отсутствие острых концентраторов является вязкое разрушение, обусловленное зарождением и развитием пор материала и состоящее из следующих последовательных этапов [10–13]:

- зарождение пор вязкого разрушения при развитии пластическом течении металла конструкции в области геометрических концентраторов;

- увеличение размеров пор при пластическом деформировании;

- взаимодействие и объединение пор вязкого разрушения;

- зарождение макродефекта и связанное с ним снижение несущей способности как дефектного участка, так и конструкции в целом;

- развитие макродефекта.

Указанные этапы вязкого разрушения имеют различную физико-механическую природу, поэтому для определения характеристик предельного состояния трубопроводного элемента необходимо построение соответствующей комплексной модели.

Принято считать, что зарождение пор в области структурных дефектов и неоднородностей (так называемые первичные поры) связано с существенным развитием пластических деформаций, которое может быть описано посредством параметра Одквиста [8]:

$$\kappa = \int d\varepsilon_i^p, \quad (3)$$

где $d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$; $d\varepsilon_{ij}^p$ – компоненты тензора приращений пластических деформаций, $i, j = r, \varphi, z$ – пространственные координаты цилиндрической системы координат (рис. 1).

Соответственно, условием зарождения пор с начальной объемной концентрацией f_0 в рассматриваемой области конструкции является превышение текущего значения параметра Одквиста критической величины κ_c .

Дальнейший рост зародившихся пор зависит от жесткости напряженного состояния и интенсивности пластического деформирования металла и описывается законом Райса–Трейси, а именно [8]:

$$df = f_0 K_1 \exp(K_2 R_\sigma) d\varepsilon_i^p, \quad (4)$$

где f – текущая объемная концентрация пор вязкого разрушения; $R_\sigma = \sigma_m / \sigma_i$ – параметр жесткости напряженного состояния; $\sigma_m = (\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz})/3$ – мембранное напряжение; $\sigma_i = \sqrt{0,5 \sigma_{ij} \sigma_{ij}}$ – интенсивность напряжений; $K_1 = 0,28, K_2 = 1,5$ – константы.

Небольшие значения R_σ в рассматриваемой области конструкции (что типично для трубопроводных элементов с плавными геометрическими концентраторами) и, как следствие, низкая скорость роста пор согласно (4), являются предпосылками для альтернативного механизма развития пористости, а именно появления вторичных несплошностей. Согласно материалам, представленным в [8], скорость зарождения вторичных сферических пор зависит от концентрации включений в металле конструкции и развития пластических деформаций по следующему закону:

$$f = f_0 + f_i \exp \left(- \frac{\kappa'}{\kappa - \kappa_c} \right), \quad (5)$$

где f_i – объемная концентрация включений; κ' – константа материала, характеризующая максимально возможное приращение параметра Одквиста.



Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции с позиций вязкого разрушения в данной работе проводили на основе численного решения краевой задачи упруго-пластического деформирования среды переменного несущего нетто-сечения путем прослеживания упруго-пластических деформаций и концентрации пор вязкого разрушения при нагружении конструкции до предельного состояния в рамках конечно-элементной модели [13, 14]. Связь напряжений и деформаций определялась законом Гука и ассоциированным законом пластического течения исходя из следующих соотношений:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m) + \delta_{ij} (K \sigma_m + \Delta f / 3) - \frac{1}{2G} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m)^* + (K \sigma_m)^*, \quad (6)$$

где $K = \frac{1-2\nu}{E}$, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; Ψ – функция состояния материала, определяемая условием пластического течения согласно критерию Мизеса с дополнительным учетом уменьшения несущего нетто-сечения конечного элемента в результате формирования несплошности в рамках модели Гурсона–Твергаарда:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f^*)^2 - 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_T}\right)}; \quad (7)$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i \geq \sigma_s,$$

где $q_1 = 1,5$, $q_2 = 1$, $q_3 = 1,5$ – константы; f^* – эквивалентная объемная концентрация пор, учитывающая их взаимодействие в конечном элементе.

Величина эквивалентной концентрации пор, фигурирующая в выражении (7), определяется из следующего соотношения, предложенного Твергаардом и Нидлманом [7]:

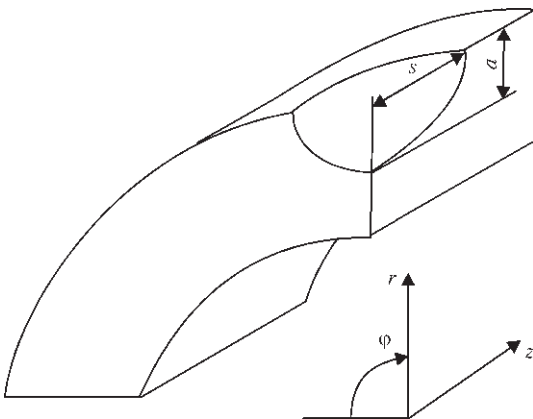


Рис. 1. Схема участка трубопровода с внешним полуэллиптическим дефектом локального утонения стенки (с учетом плоскостей симметрии)

$$f^* = \begin{cases} f, & \text{если } f \leq f_c; \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), & \text{если } f > f_c, \end{cases} \quad (8)$$

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

Предельное состояние каждого конечного элемента определяется двумя возможными механизмами разрушения [15] (пластической неустойчивостью в случае $\Psi \rightarrow \infty$ согласно условию Макклиттока и микросколом) и может быть описано следующим критерием:

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \frac{\varepsilon_f - \kappa^*}{1,5\sigma_s(\kappa, T)} \text{ — пластическая неустойчивость}; \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_1}{1-2f/3} > S_K \text{ — разрушение микросколом.}$$

Проверку точности изложенной методики проводили с помощью данных экспериментальных исследований величины предельного давления толстостенных труб ($D \times t = 76,2 \times 8,97$ мм, сталь 20, $\sigma_T = 336$ МПа) с внешними дефектами утонения полусферической формы различного размера [16]. Следует отметить, что рассматриваемые трубные образцы без дефектов выдерживают давление $P_{\max}^0 = 110$ МПа по экспериментальным данным (114 МПа согласно результатам расчета по изложенной методике). Сравнение численных и экспериментально определенных значений максимального давления P_{\max} и снижения несущей способности P_{\max} / P_{\max}^0 образцов с изолированными поверхностными дефектами утонения стенки показало небольшое относительное отклонение около 7 % (табл. 1).

Коэффициент A в выражениях (1), (2) характеризует возможность разрушения конечного элемента при относительно низких напряжениях. Теоретически существует ненулевая вероятность зарождения разрушений при напряжениях, близких к нулю ($A = 0$), но для решения прикладных задач такой подход не является рациональным. Для снижения трудоемкости численного исследования предполагается, что вероятностный характер разрушения проявляется при напряжениях, превышающих напряжение пластического течения σ_{flow} , которое зависит от прочностных свойств конкретного материала, а именно $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_T) / 2$. В свою очередь значение m для описания разрушения конструкционных сталей принимается равным 3...4. Таким образом, целью анализа полей напряжений в конструкции в предельном состоянии



Таблица 1. Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований влияния глубины поверхностного дефекта полусферического сечения на предельное давление в толстостенной трубе

Глубина дефекта, мм	Экспериментальные данные [16]		Результаты моделирования	
	P_{max} , МПа	P_{max} / P_{max}^0	P_{max} , МПа	P_{max} / P_{max}^0
4,0	91,8	0,835	88,0	0,772
4,5	85,3	0,775	85,5	0,750
5,0	82,8	0,753	83,5	0,733

является определение параметра B распределения Вейбулла, что позволит проводить необходимые количественные оценки вероятности аварийной ситуации на дефектном участке трубопровода.

Предельное состояние дефектной конструкции характеризуется двумя этапами нарушения целостности, а именно зарождением микропор при развитом пластическом течении металла и началом разрушения конечных элементов (образованием макродефектов) [10]. В первом случае вероятность аварийной ситуации принимается равной минимально возможной при типичных лабораторных исследованиях образцов на разрыв ($p = 0,01 \dots 0,05$), во втором случае состояние конструкции недопустимо ($p = 0,95$).

В качестве примера использования данной методики для анализа вероятности аварийной ситуации был рассмотрен случай прямолинейного толстостенного трубопроводного элемента (сталь Х80) с внешним полуэллиптическим поверхностным дефектом. Его предельное состояние анализировалось варьированием внутреннего давления, критическим сечением принималось продольное сечение по оси симметрии дефекта (область максимального утонения стенки).

Параметры расчета

Предел текучести стали σ_T , МПа	560
Предел прочности стали σ_B , МПа	630
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Модуль Юнга E , ГПа	205
Толщина стенки трубы t , мм	39
Диаметр трубы D , мм	800
Коэффициент Вейбулла m	4
Коэффициент Вейбулла A , МПа	595
Критическое значение параметра Одквиста k_c	0,01
Начальная концентрация пор при зарождении f_0	0,05
Константа материала S_0 , мм	1

С целью корректного определения параметра Вейбулла B провели комплекс расчетов предельного давления, которое может выдержать рассматриваемая труба с внешними поверхностными дефектами различных размеров. На рис. 2, *a* приведен пример распределения главных напряжений в критическом сечении трубы с дефектом длиной 100 мм, шириной 40 мм и глубиной 14 мм

при внутреннем давлении 59,3 МПа, при котором появились первые макропоры (один из конечных элементов потерял несущую способность). Из показанных распределений видно, что область высоких напряжений ($\sigma_1 > A = 595$ МПа) ограничена длиной дефекта, что является характерным размером области ненулевых вероятностей локального разрушения согласно (1). Соответственно, если считать, что это напряженное состояние соответствует вероятности разрушения 0,95, то значение коэффициента B составляет 1580 МПа. Для альтернативного предположения, что предельное состояние характеризуется зарождением первых микропор, для которого вероятность разрушения равна 0,05, расчет показал $B = 4300$ МПа. Из этого, в частности, следует вывод, что первый подход является более консервативным, поэтому использование этого критерия предельного состояния конструкции является более рациональным.

В табл. 2 приведены результаты расчета коэффициентов Вейбулла B для такой же трубы, но с дефектами других размеров. Как видно из приведенных данных, влияние изолированных геометрических аномалий в рассмотренных диапазонах варьирования на значение этого коэффициента невелико и связано со спецификой конечно-элементного разбиения области дефекта. Это подтверждает тот факт, что коэффициент B является характеристикой материала для конкретного характера напряженного состояния и масштабности задачи. Рассмотренный диапазон изменения геометрических размеров поверхностных дефектов является достаточно репрезентативным для настоящего исследования, так как для менее глубоких дефектов влияние концентратора существенно

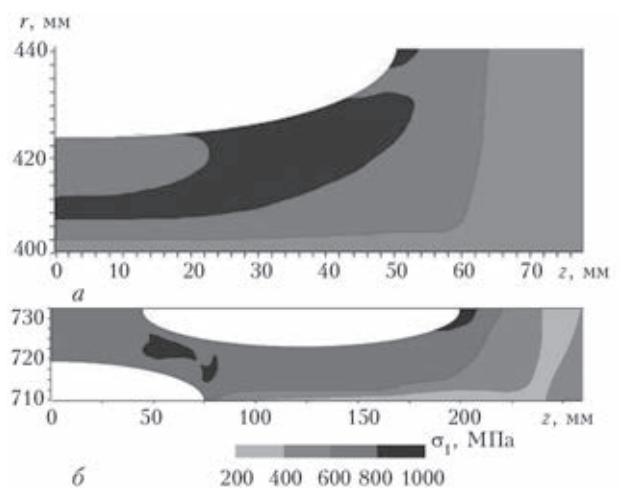


Рис. 2. Распределение главных напряжений: *a* – в области изолированного дефекта утонения стенки трубопровода $D \times t = 800 \times 39$ мм (сталь Х80) под действием предельного давления 59,2 МПа; *б* – в области множественного дефекта утонения стенки трубопровода $D \times t = 1420 \times 25$ мм (сталь Х60) под действием предельного давления 14,4 МПа ($0r$ – ось симметрии)

Т а б л и ц а 2. Значения коэффициента распределения Вейбулла B для дефектов различных размеров на поверхности трубопровода из стали X80, $D \times t = 800 \times 39$ мм

Глубина дефекта a , мм	Условие предельного состояния по зарождению микропор ($p = 0,05$) для дефектов разной длины $2s$, мм			Условие предельного состояния по макроразрушению ($p = 0,95$) для дефектов разной длины $2s$, мм		
	100	150	200	100	150	200
6	4660	4460	4630	1680	1650	1690
10	4210	4600	4780	1650	1650	1800
14	4300	4500	4640	1580	1830	1890

снижается и сравнимая по величине вероятность разрушения конструкции появляется на периферии дефекта, а более обширные коррозионные повреждения можно отнести к общей коррозии и большее влияние на результат расчета будет оказывать масштабный эффект, а не концентрация напряжений. Поэтому для исследования вероятности разрушения могут быть рекомендованы минимальные значения коэффициентов, в рассматриваемом случае это $B = 1580$ МПа. В качестве примера расчета вероятности разрушения дефектного участка ММТ на рис. 3 приведены зависимости вероятности разрушения от внутреннего давления вплоть до предельного для рассматриваемого трубопровода с дефектами различной глубины при постоянных глубине и ширине, равных 150 и 40 мм соответственно. Для типичных рабочих диапазонов эксплуатационных нагрузок до 22 МПа величина вероятности разрушения не превышает $4 \cdot 10^{-4}$, что является допустимым с точки зрения суммарного риска аварийной ситуации ММТ. При анализе предельного состояния на основе конкретного значения расчетной вероятности необходимо принимать во внимание два важных аспекта:

– в расчет значений внутренних давлений в трубопроводе не включаются различные коэффициенты запаса, принятые в практике проектирования трубопроводных систем, что должно учитываться при определении предельно допустимой вероятности аварийной ситуации для конкретного

участка ММТ в рамках соответствующих процедур риск-анализа;

– в настоящем исследовании не учитывается возможность расположения дефекта в области окружных сварных швов, что может иметь дополнительное негативное воздействие на предельное состояние конструкции; методика оценки влияния локального напряженно-деформированного состояния и накопленной в процессе сварки поврежденности на особенности вязкого разрушения трубопроводов с поверхностными дефектами рассмотрена авторами в работе [17].

Для оценки влияния прочностных характеристик конкретной стали ММТ на процессы вязкого разрушения и вероятность аварийной ситуации был проведен комплекс аналогичных численных исследований для сталей различного класса прочности (предела прочности). Это позволило определить зависимость параметра Вейбулла B от предела прочности используемой стали (рис. 4). При этом не было обнаружено существенного влияния величины дефекта или типоразмера труб на величину этого коэффициента, из чего можно сделать вывод, что параметр B является характеристикой механических свойств материала трубопровода, а геометрический и масштабный факторы корректно описываются интегральным функционалом решением задачи определения напряженно-деформированного состояния конструкции. Как показано на рис. 5, класс прочности стали существенно влияет на вероятность разрушения в об-

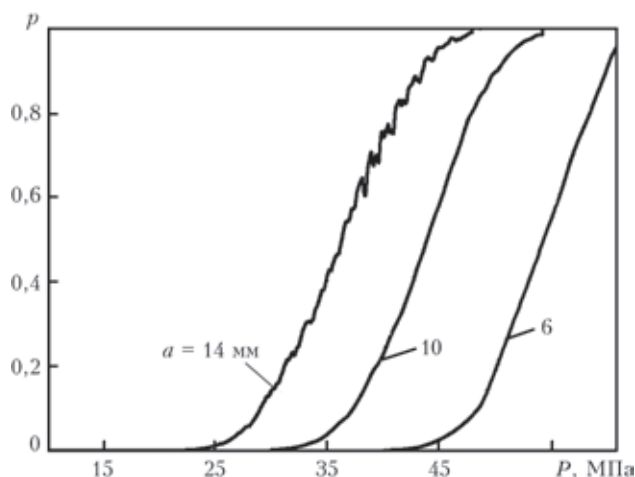


Рис. 3. Зависимость вероятности разрушения трубопровода ($D \times t = 800 \times 39$ мм, сталь X80) с дефектами утонения стенки различной глубины от внутреннего давления

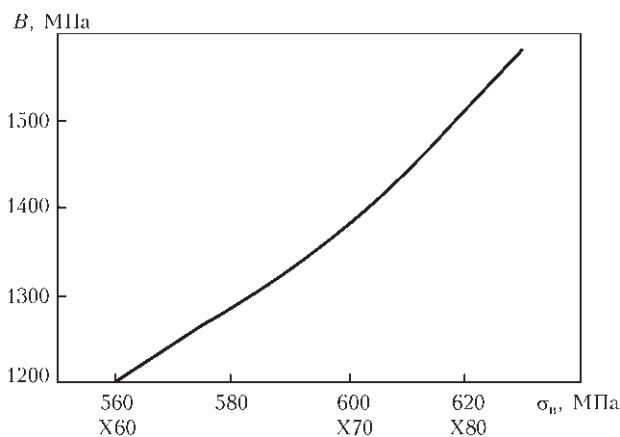


Рис. 4. Зависимость консервативного значения параметра Вейбулла от предела прочности (класса прочности) стали трубопровода

ласти дефектов утонения: вероятность разрушения трубопроводных элементов $D \times t = 800 \times 39$ мм с внешним дефектом утонения стенки из сталей X60 и X80 может отличаться в 10 раз в зависимости от приложенного внутреннего давления.

При анализе состояния дефектных трубопроводных элементов со сложным многоочаговым повреждением, в частности, множественной язвенной коррозией, состоящей из нескольких близко расположенных полуэллиптических дефектов, актуальные стандарты предписывают схематизировать множественный дефект как один, охватывающий всю поврежденность в целом. Разработанная методика вероятностной оценки рассматривает конструкцию в ее фактическом состоянии поврежденности, учитывая переменную толщину стенки по всей области вероятного разрушения. В качестве примера сложного эксплуатационного повреждения рассматриваемой трубы ниже приведен случай трех симметрично расположенных дефектов на различных поверхностях трубопровода, размеры которых одинаковы (длина 150 мм, глубина 10 мм, ширина 40 мм), что не ограничивает общности данного анализа. На рис. 2, б показаны поля главных напряжений для множественного дефекта при предельном давлении 14,4 МПа. Как видно из приведенных данных, взаимное расположение дефектов таково, что наблюдается явное взаимодействие полей напряжений, которое вызывает формирование общей области существенного пластического течения, где зарождается поврежденность как по вязкому механизму, так и по микросколу. При этом величина вероятности при различных давлениях (рис. 6) иллюстрирует развитие этого взаимодействия: чем выше давление, тем больше проявляется ослабление трубопровода в области наложения дефектов и тем более чувствительной является показанная зависимость к увеличению давления. При этом снижение несущей способности трубопровода с множественным коррозионным повреждением составило около 20 % по сравнению с одиночным дефектом такого же размера (предельное давление $P_{\max} = 18,2$) и более 30 % в сравнении с бездефектным состоянием ($P_{\max} = 20,8$ МПа).

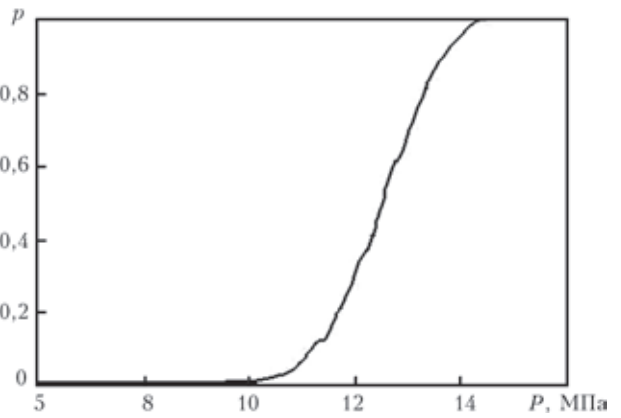


Рис. 6. Зависимость вероятности разрушения трубопровода $D \times t = 1420 \times 25$ мм (сталь X60) с многоочаговым дефектом утонения стенки от внутреннего давления

Рис. 5. Сравнение зависимостей вероятности разрушения трубопровода с дефектом локальной потери металла $2s \times a = 150 \times 14$ мм при различных прочностных свойствах стали конструкции: 1 – $\sigma_B = 560$ МПа; 2 – 630

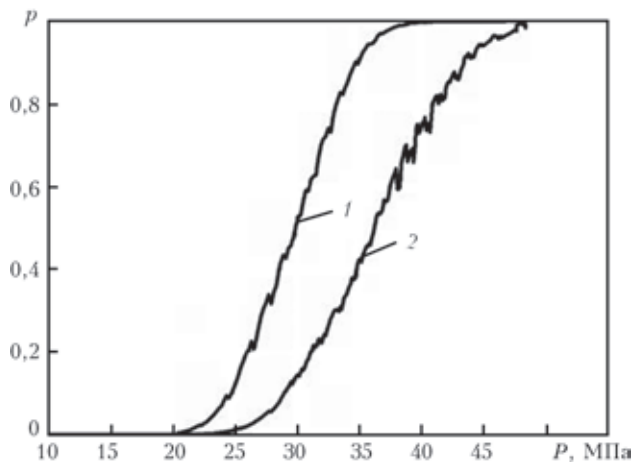


Рис. 5. Сравнение зависимостей вероятности разрушения трубопровода с дефектом локальной потери металла $2s \times a = 150 \times 14$ мм при различных прочностных свойствах стали конструкции: 1 – $\sigma_B = 560$ МПа; 2 – 630

Выводы

Предложен методологический подход численной оценки вероятности разрушения толстостенных трубопроводных элементов с поверхностными дефектами локальной потери металла. В основу подхода положен анализ предельного состояния конструкции под действием внутреннего давления, исходя из предположения о преимущественно вязком характере разрушения конструкции в области геометрической аномалии. Показано, что консервативным условием достижения предельного состояния конструкции является формирование первых макропор.

Получена зависимость параметра Вейбулла B , необходимая для количественной оценки вероятности разрушения трубопровода с локальным утонением стенки, от класса прочности (предела прочности) стали. Показано, что этот параметр является характеристикой механических свойств материала и может быть использован для вероятностного анализа состояния трубопроводов из труб различных типоразмеров и характера коррозионной поврежденности.

Исследовано предельное состояние трубопровода с многоочаговым коррозионным повреждением внутренней и внешней поверхности трубы. Показано значительное влияние близко расположенных дефектов как на несущую способность трубопровода, так и на характер предельного состояния и разрушения. Это проявляется в формировании общей области микроповрежденности металла по всей зоне коррозионного поражения и соответствующем влиянии масштабного фактора на вероятность разрушения.



1. *Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management. Contract research report 363/2001 / B. Wintle, B. W. Kenzie, G. J. Amphlett et al. // Merseyside: Health and Safety Executive, 2003. – 186 p.*
2. *Muhlbauer Kent. W. Pipeline Risk Management Manual. Ideas, Techniques, and Resources. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2004. – 422 p.*
3. *Bjornoy O. H., Marley M.J. Assessment of corroded pipelines: Past, Present and Future / Proc. of 11th Intern. Offshore and Polar Engineering conf. Stavanger, Norway, June 17–22, 2001. – №1. – P. 93–101.*
4. *Janelle J. L. An overview and validation of the fitness-for-service assessment procedures for local thin areas. – Thesis for the degree Master of Science – Mechanical Engineering. The Graduate Faculty of the University of Akron, 2005. – 264 p.*
5. *ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 91 с.*
6. *Fitness-for-Service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First edition. Washington: API Publications and Distribution, 2000. – 625 p.*
7. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций // Автомат. сварка. – 2008. – № 5. – С. 5–10.*
8. *Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability / J. of Applied Mechanics. – 1951. – № 9. – P. 293–297.*
9. *Local approach to fracture // C. Berdin, J. Besson, S. Bugat et al. – Paris: Les Presses de l’Ecole des Mines, 2004. – 89 p.*
10. *Ductile fracture initiation, propagation and arrest in cylindrical vessels / W. A. Maxey, J. F. Kiefner, R. J. Eiber et al. // Fracture Toughness, Proc. of the 1971 National Symp. On Fracture Mechanics, 31 Aug. – 02 Sept. 1971, Urbana-Champaign, USA. – Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1972. – P. 70–81.*
11. *Gurson A. I. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1 – yield criteria and flow rules for porous ductile media // J. of Engineering Materials and Technology. – 1977. – №1. – P. 2–15.*
12. *Махненко В. И. Проблемы экспертизы современных сварных конструкций ответственного назначения // Автомат. сварка. – 2013. – №5. – С. 22–29.*
13. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – С.-Пб.: Политехника, 1993. – 391 с.*
14. *Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.*
15. *Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.*
16. *Wu D., Huang Z., Chen L. A study of the limit pressures of thick walled pipes with part-through slots on the outside surface // Int. J. Pres. Ves. and Piping. – 1985. – № 20. – P. 207–221.*
17. *Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин и др. // Автомат. сварка. – 2013. – № 9. – С. 26–31.*

A procedure has been developed and realized for numerical analysis of limit state of pipeline elements with surface geometrical anomalies of the type of local corrosion loss of metal, allowing for probabilistic nature of structure failure in the complex stress-strain state, while proceeding from the assumption of predominantly viscous failure mode. The case of off-shore main pipeline elements with defects of various sizes was used to determine probabilistic failure parameters and to study the features of the influence of various extent of damage on load-carrying capacity of structures with defects. Versatility of the proposed approach was demonstrated, allowing application of modern methods of numerical analysis of the stress-strain state to perform the required calculations of the probability of emergency conditions in critical industrial facilities. 17 References, 2 Tables.

К е у в о р д с : pipeline, local metal loss, limit state, ductile fracture, emergency probability, Weibull parameters

*Поступила в редакцию
12.01.2014*

НОВА КНИГА

Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання / В. М. Учанін. – Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.

Монографія присвячена розробці вихрострумових перетворювачів (ВСП) подвійного диференціювання. Як утворювальний елемент для їх побудови розглянуто особливості анаксіальних ВСП.

Проаналізовано конструкції і механізми формування сигналів від дефектів у ВСП подвійного диференціювання. Подано результати досліджень, які засвідчують їх можливості для розв’язання найскладніших задач неруйнівного контролю.

Для наукових співробітників і інженерів, що займаються дослідженням і розробкою методів і засобів неруйнівного контролю, а також аспірантів і студентів вузів зі спеціальностей «Методи неруйнівного контролю» і «Діагностика матеріалів і конструкцій».



СВЯЗЬ МЕЖДУ УДЕЛЬНЫМИ РАБОТАМИ РАЗРУШЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ УДАРНЫХ ОБРАЗЦОВ С РАЗЛИЧНЫМИ РАДИУСАМИ ЗАКРУГЛЕНИЯ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР

В. П. ДЯДИН

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

Рассматривается возможность перехода от норм ударной вязкости, установленных на образцах Менаже (образец с круглым надрезом), к аналогичным нормам на образцах типа Шарпи (образец с острым надрезом) для низколегированных и малоуглеродистых конструкционных материалов в области переходных температур. Показано, что использование критерия определения критической температуры хрупкости по проценту волокна в изломе образца Менаже ($F_U \geq 50\%$) с практической точки зрения является более обоснованным, поскольку в данном случае, исходя из представленных результатов исследований, в неявном виде предполагается исключение возможности хрупкого зарождения разрушения образца Шарпи. Отмечено, что использование данной характеристики в первую очередь связано с тем, что между удельной работой разрушения образца Шарпи и процентом волокна в изломе существует линейная зависимость между процентом волокна в изломе образцов при одинаковых температурах испытания в диапазоне от 100 % волокна до 50 % и от 100 % волокна до 20 % соответственно. Библиогр. 4, рис. 3.

Ключевые слова: ударная вязкость, образец Шарпи, образец Менаже, хрупко-вязкое разрушение, переходная область температур

Наибольший практический интерес при определении значения ударной вязкости материала на стандартных образцах представляют те случаи, когда разрушение ударного образца происходит по смешанному механизму: зарождение вязкой трещины с последующим хрупким или хрупко-вязким распространением.

Проблеме сопротивляемости строительных сталей и их сварных соединений хрупким разрушениям посвящено множество работ. Многие авторы предлагают проводить изучение этого вопроса на крупногабаритных образцах по различным методикам. Однако до сих пор основным критерием стойкости конструкционных материалов сопротивлению хрупкому разрушению считается показатель ударной вязкости. Так, в зарубежной практике за основу приняты показатели ударной вязкости, полученные на образцах с V-образным надрезом, тогда как в отечественной до сих пор на образцах с круглым надрезом типа 1 (ГОСТ 19282–73; 19281–73; 6713–75; 5521–76).

Данные разных подходов к оценке вязкости материалов приводят к неоднозначным результатам и выводам (сталь по-разному реагирует на конфигурацию надреза). В связи с этим в последние годы в отечественную нормативную документацию были введены на факультативной основе требования к определению ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом (ГОСТ 19282–73, ГОСТ 6713–75 и др.).

Переход от норм ударной вязкости, установленных на образцах Менаже (образец с круглым надрезом), к аналогичным нормам на образцах типа Шарпи (образец с острым надрезом) для многочисленных конструкционных материалов, из которых ранее были изготовлены конструкции, требует пересмотра большого объема нормативной документации. Данную задачу практически невозможно решить из-за разности принятых критериев к требованиям материалов и их сварных соединений.

Определение переходного коэффициента от одного показателя ударной вязкости к другому экспериментальным путем очень проблематично. Это в первую очередь относится к уже эксплуатируемым конструкционным материалам, для которых отсутствуют экспериментальные данные значений ударной вязкости образцов Шарпи.

Дополнительные трудности возникают также тогда, когда разрушение образцов начинает носить смешанный характер в связи с наблюдаемым бимодальным изменением работы разрушения, связанным с нарушением устойчивого состояния соблюдения условий плоской деформации.

Все это в значительной степени усложняет определение переходного коэффициента, который позволил бы связать показатели ударной вязкости образцов с различными радиусами закругления в переходной температурной области как для эксплуатируемого оборудования, так и для вновь проектируемого.



В данной статье рассматривается вариант упрощенного подхода к связи между удельными работами разрушения стандартных ударных образцов с различными радиусами закругления в данном температурном интервале.

Учитывая результаты работ [1–4], можно сопоставить удельную работу зарождения вязкой трещины образца Менаже с удельной работой хрупкого разрушения образца Шарпи:

$$\left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_T}\right)^{1+n} = \frac{K_2^2 4(1+n)}{\left(1 + \frac{4}{\rho_2} r_*\right) (B-b) k_3 \sigma_T 3\varepsilon_T} a_{U_B}^3, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_T}\right)^{1+n} = \frac{4(1+n) E \cdot 2,18 \cdot 1,18}{3(B-b) k_1 \sigma_T^2} a_{V_{xp}}^3, \quad (2)$$

где ε_L – деформация Людерса на площадке текучести материала; ε_f – критическая локальная пластическая деформация на расстоянии r_* от вершины надреза образца Шарпи; ε_T – деформация на пределе текучести материала; σ_T – предел текучести материала; ρ_2 – радиус надреза в образце Менаже ($\rho_2=1,0$ мм); r_* – расстояние от вершины надреза, принимаемое равным среднему характерному размеру структурного элемента ($r_*=0,06$ мм); n – величина деформационного упрочнения материала; K_2 – коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза образца Менаже ($K_2=2,1$); k_1 – коэффициент стеснения для образца Шарпи, равный 1,25; k_3 – коэффициент стеснения для образца Менаже, равный 1,225; $(B-b)$ – высота образца под надрезом, равная 8 мм; E – модуль упругости.

Откуда, принимая хрупкую работу распространения в образце Шарпи $a_{V_{xp}}^p = 0$, следует:

$$\frac{a_{U_B}^3}{a_{V_{xp}}^3} = \frac{a_{U_B}^3}{a_{V_{xp}}^3} = 2,57 \frac{1 + \frac{4}{\rho_2} r_*}{K_2^2} \frac{k_3}{k_1} \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_L}\right)^{1+n}, \quad (3)$$

где $a_{V_{xp}}$ – удельная работа разрушения образца Шарпи при условии вязкого зарождения разрушения с последующим его хрупким развитием.

Выражение (3) позволяет аналитическим путем выявить значительное повышение переходного коэффициента, связывающего показатели ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже, в некоторой области температур, когда реализуется условие хрупкого разрушения образца Шарпи. Экспериментальное подтверждение данного факта видно из рис. 1. Вместе с тем необходимо отметить, что, с одной стороны, в зависимости (3) не учитываются возможные работы вязкого распространения разрушения образцов Менаже и Шарпи, которые,

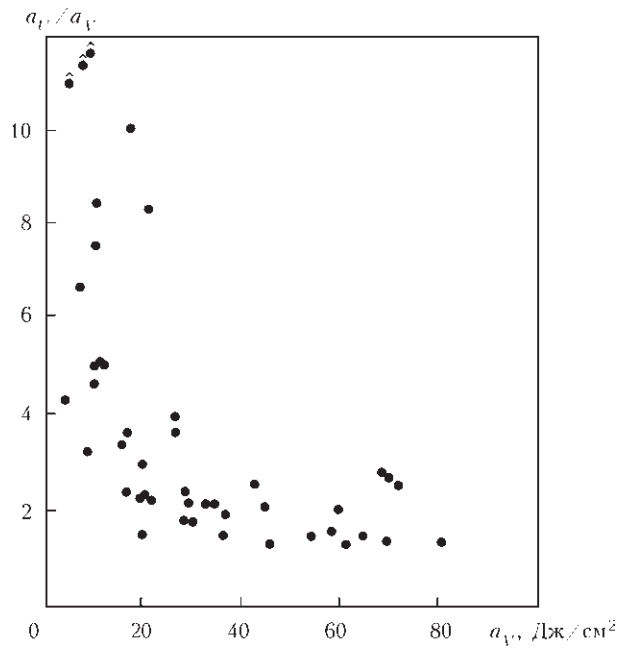


Рис. 1. Зависимость a_U/a_V от величины a_U для сварных соединений, выполненных проволоками Св-08А, Св-10Г2, Св-08Г2С и Св-10ГСМТ под флюсом Ан-43

в свою очередь, могут быть оценены по процентному содержанию волокна в изломах. С другой стороны, определение переходного коэффициента, связывающего показатели ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже, в некоторой области температур, когда значение ударной вязкости образца с U-образным надрезом близки к его регламентируемому значению ($a_U \approx 30$ Дж/см²), может встречать значительные трудности в связи с различием переходных температур зарождения хрупкого разрушения рассматриваемых типов образцов. Это хорошо видно на рис. 2, где приводится сопоставление значений ударной вязкости образцов Менаже и величины переходного коэффициента при одинаковых температурах испытания.

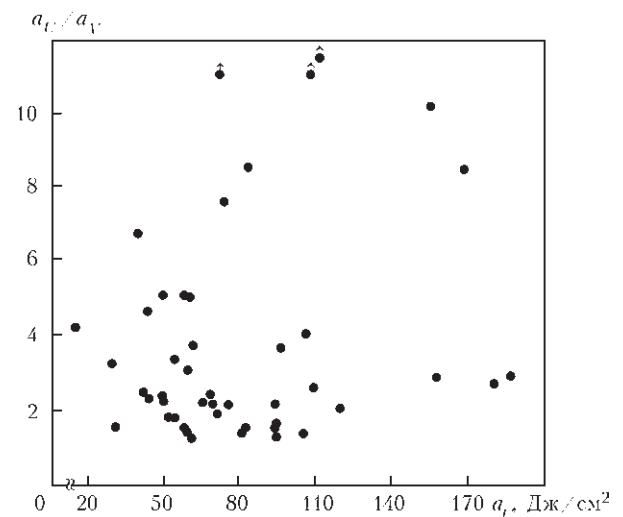


Рис. 2. Зависимость характеристики a_U/a_V от величины a_U для сварных соединений, выполненных проволоками Св-08А, Св-10Г2, Св-08Г2С и Св-10ГСМТ под флюсом Ан-43



Как видно из рисунка, значение переходного коэффициента, в зависимости от ударной вязкости a_U , характеризуется значительным разбросом, что ставит под сомнение возможность определения данной характеристики напрямую от величины a_U . Вместе с тем сопоставление значений переходного коэффициента от ударной вязкости a_V при одинаковых температурах показывает на возможность установления такой зависимости.

Однако в данном случае, необходимо будет решать обратную задачу.

В то же время хрупкое разрушение образца Шарпи может происходить при температурах, когда еще возможно вязкое развитие трещины в образце Менаже, что приводит к неоднозначной оценке критической температуры хрупкости конструктивных материалов по критерию: $a_U \geq 30$ Дж/см².

В этой связи использование критерия определения критической температуры хрупкости по проценту волокна в изломе образца Менаже ($F_U \geq 50\%$), с практической точки зрения является более обоснованным, поскольку в данном случае, исходя из результатов исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, в неявном виде предполагается исключение возможности хрупкого зарождения разрушения образца Шарпи. Так, на рис. 3 представлены данные сопоставления процента волокна в изломах образцов Менаже и Шарпи при одинаковых температурах испытания для различных сварных соединений.

Таким образом, подводя итог сказанному выше, следует отметить, что для определения величины переходного коэффициента по результатам испытаний образцов Менаже, необходимо рассматривать еще некоторые дополнительные

характеристики, которые позволили бы учитывать особенности перехода к хрупкому зарождению трещины в образцах данных типов.

Одной из таких дополнительных характеристик можно рассматривать процентное содержание волокна в изломах.

Предпочтение в выборе данной характеристики в первую очередь связано с тем, что между удельной работой разрушения образца Шарпи и процентом волокна в изломе существует линейная зависимость, которая подтверждается значительным объемом литературных данных.

В то же время, как видно из рис. 3, при условии вязкого зарождения разрушения образцов Менаже и Шарпи наблюдается линейная зависимость между процентом волокна в изломе образцов при одинаковых температурах испытания в диапазоне от 100 % волокна до 50 % и от 100 % волокна до 20 %, соответственно.

На основании проведенных экспериментальных исследований, с привлечением дополнительных литературных данных для ряда сварных соединений, было сделано предположение о возможности описания такой связи следующей зависимостью:

$$F_U = 0,62F_V + 37,5. \quad (4)$$

Значения текущих работ разрушения образцов данных типов в общем виде могут быть выражены следующими зависимостями:

$$a_V = a_V^3 + a_V^p, \quad (5)$$

$$a_U = a_U^3 + a_U^p, \quad (6)$$

где a_V^3 и a_U^3 – текущие удельные работы зарождения разрушения образцов Шарпи и Менаже; a_V^p и a_U^p – удельные работы распространения в образцах при соответствующей температуре испытания.

Необходимо отметить, что рассматриваемые характеристики зависят от ряда параметров и меняются от температуры, что не позволяет выразить их в простой аналитической форме.

Вместе с тем, учитывая наличие линейной связи между процентом волокна в изломе и удельной работой разрушения образца Шарпи, зависимость (5) может быть заменена более простым выражением:

$$a_V = \left(a_V^{\max} - a_{V_{xp}} \right) F_V + a_{V_{xp}}, \quad (7)$$

где F_V – доля волокна в изломе.

Выражение (7), хотя и является чисто эмпирическим, имеет ряд важных достоинств, поскольку позволяет оценивать текущие значения ударной вязкости во всем температурном диапазоне вне зависимости от характера и вида разрушения.

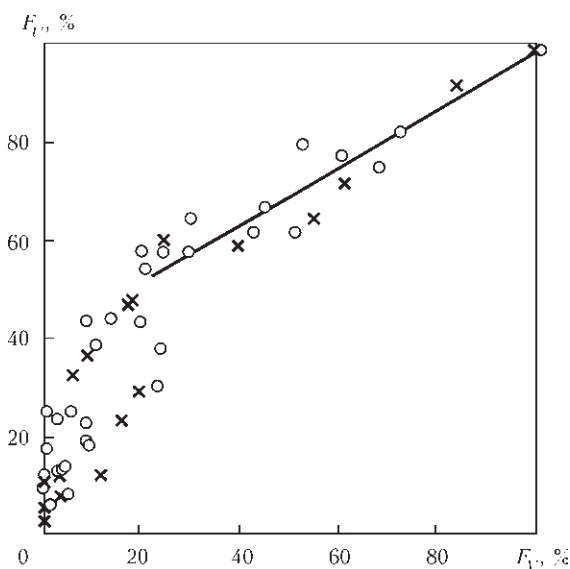


Рис. 3. Зависимость процента волокна в изломах образцов Менаже и Шарпи для сварных соединений, выполненных проволоками Св-08А, Св-10Г2, Св-08Г2С и Св-10ГСМТ под флюсом Ан-43

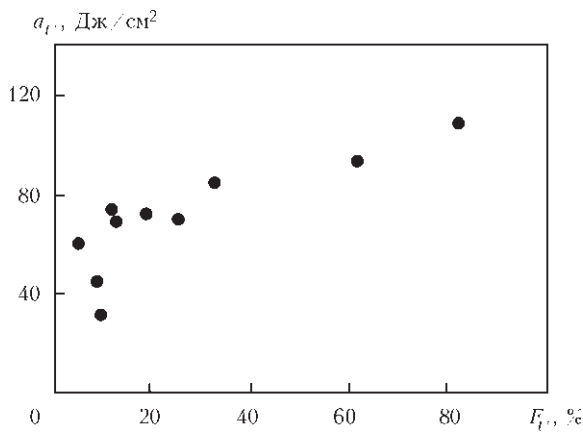


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости от процентного содержания волокна в изломе образца Менаже для сварного соединения, выполненного проволокой Св-08А под флюсом Ан-43

Что касается текущей удельной работы разрушения образца Менаже, то, как показывают практические исследования изменения данной характеристики, в достаточно широком диапазоне температур наблюдается незначительное ее падение при изменении процента волокна в изломе (рис. 4).

Это связано с тем, что в данном диапазоне температур удельная работа зарождения вязкого разрушения в образце Менаже доминирует над работой распространения. Последнее не дает возможности описать такую связь простой линейной зависимостью во всем температурном диапазоне ввиду резкого «перелома» кривой при переходе к хрупкому зарождению разрушения для широкого класса материалов.

Вместе с тем, учитывая специфику производства ряда оборудования, где используются одинаковые марки сталей, такая задача вполне может быть решена. Для этих случаев по аналогии с (7) может быть получено выражение вида:

$$a_U = \left(a_U^{\max} - a_{U_{xp}} \right) \psi(F_U) + a_{U_{xp}}, \quad (8)$$

где $\psi(F_U)$ – функция доли волокна в изломе образца Менаже.

Такие выражения, с одной стороны, при их практическом использовании являются несколько ограниченными, поскольку в ряде случаев могут отсутствовать значения a_U^{\max} , $a_{U_{xp}}$.

The paper considers the possibility of transition from impact toughness norms determined on Mesnager samples (sample with a round notch) to similar norms on Charpy type samples (sample with a sharp notch) for low-alloyed and low-carbon structural materials in the transition temperature range. It is shown that application of the criterion of determination of critical brittleness temperature by fibre percentage in the fracture of Mesnager sample ($F_u \geq 50\%$) is more substantiated from the practical view point, as in this case, proceeding from the presented investigation results, elimination of the possibility of brittle initiation of Charpy sample fracture is implicitly implied. It is noted that application of this characteristic is primarily related to the fact that there is a linear dependence between specific work of fracture of Charpy sample and fibre percentage in the fracture of a Charpy sample at the same testing temperatures in the range from 100% of fibre to 50% and from 100% of fibre to 20%, respectively

Keywords: impact toughness, Charpy sample, Mesnager sample, brittle-ductile fracture, transition temperature range

Но, с другой стороны, появляется возможность определения связи в переходной области температур между текущими значениями ударной вязкости образцов Менаже и Шарпи:

$$\frac{a_U}{a_V} = \frac{\left(a_U^{\max} - a_{U_{xp}} \right) \psi(F_U) + a_{U_{xp}}}{\left(a_V^{\max} - a_{V_{xp}} \right) F_V + a_{V_{xp}}}. \quad (9)$$

Такой подход может быть использован, например, для уточнения требований к ударной вязкости к баллонам кислородного производства, поскольку при их производстве используется практически одна марка стали (ДС).

Выводы

Показано, что использование критерия определения критической температуры хрупкости по проценту волокна в изломе образца Менаже ($F_U \geq 50\%$), с практической точки зрения является более обоснованным, поскольку в данном случае, предполагается исключение возможности хрупкого зарождения разрушения образца Шарпи.

Показано, что между удельной работой разрушения образца Шарпи и процентом волокна в изломе существует линейная зависимость между процентом волокна в изломе образцов при одинаковых температурах испытания в диапазоне от 100 % волокна до 50 % и от 100 % волокна до 20 %, соответственно

Наличие данной линейной связи может быть использовано для сравнения значений ударной вязкости образцов в переходной области температур.

1. Шишкин В. Ю., Макурин В. А., Ефимов П. И. О форме надреза в ударных образцах и значениях ударной вязкости // Зав. лаборатория. – 1987. – № 3. – С. 71–74.
2. Баско Е. М. Влияние остроты надреза на ударную вязкость и критические температуры хрупкости строительных сталей // Там же. – 1989. – № 7. – С. 73–77.
3. Дядин В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Автомат. сварка. – 2004. – № 4. – С. 24–29.
4. Дядин В. П. Особенности испытания ударных образцов Менаже и Шарпи при хрупком разрушении // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011 – № 4. – С. 44–47.

Поступила в редакцию
15.03.2014



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В. Ю. ГЛУХОВСКИЙ

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

Рассмотрена возможность применения тепловизионного неразрушающего контроля паяных соединений элементов электродвигателей. Основным типом дефектов в паяных соединениях является наличие газовых включений в зоне спая, что негативно влияет на эксплуатационные характеристики конечного изделия. Для выявления возможности проведения тепловизионного контроля паяных соединений роторных обмоток электродвигателей были изготовлены контрольные образцы, как бездефектные, так и с заложенными дефектами. Пайка осуществлялась контактным методом с последующим пропусканием электрического тока и нанесением припоя. Для определения граничного значения превышения температуры зоны спая составлено основное уравнение и проведены соответствующие математические расчеты. Получена зависимость значения разности температур над зоной спая от процентного содержания несплошностей внутри паяного соединения. Проведены экспериментальные работы по тепловизионному контролю паяных соединений, подтверждающие расчетные значения температур. Построены сравнительные температурные гистограммы для бездефектного и дефектного соединений. Библиогр. 5, рис. 4.

Ключевые слова: паяные соединения, статорная обмотка электродвигателя, тепловой неразрушающий контроль, тепловизор

Качество паяных изделий определяется их прочностью, надежностью, степенью работоспособности, коррозионной стойкостью, способностью выполнять специальные функции (тепло- и электропроводность, коммутационные характеристики и т. д.). Обеспечение этих характеристик достигается оптимальными решениями в процессе производства паяного изделия. Дефекты, возникающие при изготовлении паяных изделий, можно разделить на дефекты заготовки и сборки, дефекты паяных соединений и паяных изделий.

К наиболее типичным дефектам паяных соединений относятся поры, раковины, шлаковые и флюсовые включения, непропаи, трещины. Эти дефекты классифицируют на две группы: дефекты, связанные с заполнением расплавом припоя зазора между соединенными пайкой деталями, и возникающие в процессе охлаждения изделия. Дефекты первой группы связаны главным образом с особенностями заполнения капиллярных зазоров в процессе пайки. Дефекты второй группы обусловлены уменьшением растворимости газов в металлах при переходе из жидкого состояния в твердое и усадочным явлением. К ним относится пористость кристаллизационного и диффузионного происхождения.

Одним из основных дефектов, которые чаще всего встречаются в паяном шве, является отсутствие его сплошности, пустоты и пористость. Эти дефекты нарушают непрерывность слоя припоя, они неизбежно оказывают неблагоприятное влияние на прочность паяного соединения. В зависи-

мости от условий пайки площадь пустот в паяном соединении может изменяться в пределах от 5 до 65 % всей площади спая и приводить к резкому снижению его усталостной прочности. В связи с этим для обеспечения высокого качества паяных соединений прежде всего необходимо применять методы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики [1].

При неудовлетворительном качестве паяных соединений контактов статорных обмоток электродвигателей локальный нагрев и электродинамические силы, возникающие в обмотке и зоне пайки проводников, снижают их электрическую и механическую прочность, приводят к возникновению электроразрядных процессов и к последующему выходу машины из строя. Исходя из статистики повреждаемости электродвигателей, наиболее уязвимым узлом является статор, на долю которого приходится до 60 % отказов, на втором месте – подшипниковый узел (до 22 %), далее – ротор (до 9 %) [2].

Таким образом, паяные соединения в процессе производства статорных обмоток электродвигателей должны подвергаться НК согласно соответствующим нормативным документам (ГОСТы 19249–73, 23479, 18442–80, 24715–81, 26126–84). Принцип НК – наблюдение, регистрация и анализ результатов взаимодействия с объектом контроля (ОК) воздействующих факторов (физических полей, т.е. излучений, или веществ), причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры ОК и т. п.

В зависимости от типа физического взаимодействия с ОК НК подразделяют на девять основных видов: оптический, электрический, тепловой, акустический, магнитный, вихретоковый, радиоволновой, радиационный и контроль проникающими веществами [3].

Традиционно применяемый визуально-измерительный метод не дает полной картины состояния пайки элементов статорной обмотки и не позволяет гарантированно и своевременно обнаружить скрытые дефекты. При этом задача раннего обнаружения дефектов паяных соединений может быть решена средствами тепловизионной техники под нагрузкой и может выполняться на машинах с открытым оптическим доступом при снятых торцевых щитах электродвигателя. При расположении электродвигателей во взрывоопасных помещениях на производстве (например, двигатели нефтяных насосов) их работа при снятых торцевых щитах недопустима, и в этой связи возникает необходимость для создания методики, которая позволит проводить диагностику паяк в любых по классу взрывоопасности помещениях [4].

Тепловой контроль качества паяных соединений ошинок и обмоток двигателей всех типов и классов напряжений является наиболее естественным, поскольку связан с изменением основного параметра обмотки ее локального электрического сопротивления. При контроле теплового (температурного) режима фрагментов обмоток и зон с прямым оптическим доступом паяных соединений в лобовой части использовали тепловизионную технику и термопары. Для контроля температурного поля применялся тепловизор Testo 876 с функцией SuperResolution, обеспечивающий температурную чувствительность < 80 мК. Данная модель тепловизора оснащена охлаждаемой болометрической матрицей с разрешением 160×120 (программно 320×240) с диапазоном температур до 280 °С.

Тепловой режим в зоне дефектного соединения характеризуется трехмерным температурным полем как в поперечном, так и продольном направлении относительно оси проводника. Элементарные проводники обмоток не имеют осевую симметрию в направлении, перпендикулярном продольной оси, поэтому для них характерен увеличенный уровень теплоотдачи с боковой поверхности и, как правило, большая скорость снижения температуры в продольном направлении по сравнению с цилиндрическими проводниками.

Паяное соединение статорных обмоток электродвигателя представляет собой нахлесточное соединение двух проводников с прямоугольным сечением. Величина нахлеста лежит в пределах от 2 до 2,5 длины большей стороны прямоугольника (рис. 1).

Рассмотрим модель прохождения электрического тока через плоскость припоя, лежащего меж-

ду двумя медными проводниками. При этом в качестве припоя выступает материал Пср-10. Это твердый припой на основе меди (52...52%), с добавлением цинка (35,39...38,15%) и серебра (9,7...10,3%), с температурой плавления 822...850 °С [5].

Если через проводник, имеющий температуру окружающей среды, проходит ток, то температура проводника постепенно повышается, так как вся энергия потерь при прохождении тока переходит в тепло. Скорость нарастания температуры проводника при нагреве током зависит от соотношения между количеством выделяющегося тепла и интенсивностью его отвода, а также теплопоглощающей способности проводника.

Количество тепла, выделенного в проводнике в течение времени dt , будет составлять:

$$dQ = Pdt = I^2 R_a dt, \quad (1)$$

где I – действующее значение тока, проходящего по проводнику, А; R_a – активное сопротивление проводника при переменном токе, Ом; P – мощность потерь, переходящих в тепло Вт.

Часть этого тепла идет на нагрев проводника и повышение его температуры, а остальное тепло отводится с поверхности проводника за счет теплоотдачи.

Энергия, переходящая в нагрев проводника, равна:

$$dQ_1 = Gcd\Delta T, \quad (2)$$

где G – масса токоведущего проводника, кг; c – удельная теплоемкость материала проводника (кДж/кг·К); ΔT – перегрев, т.е. превышение температуры проводника по отношению к окружающей среде:

$$\Delta T = T - T_0, \quad (3)$$

где T и T_0 – температуры проводника и окружающей среды, °С.

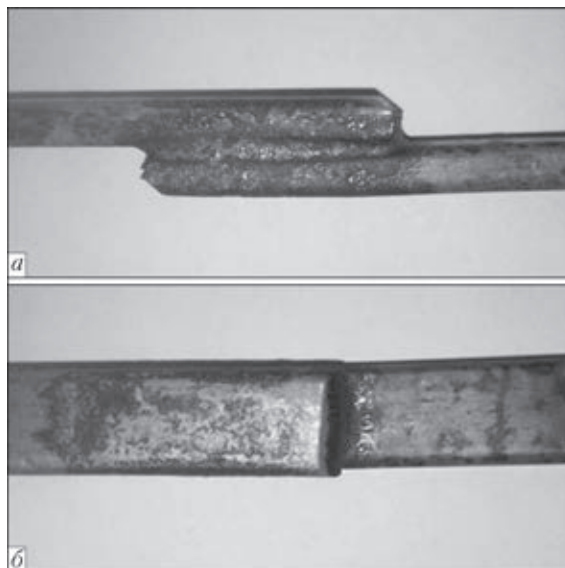


Рис. 1. Общий вид паяного соединения статорных обмоток электродвигателя: а – вид сбоку; б – сверху



Энергия, отводимая с поверхности проводника в течение времени dt за счет теплоотдачи, пропорциональна превышению температуры проводника над температурой окружающей среды:

$$dQ_2 = KF(T - T_0)dt = KF\Delta Tdt, \quad (4)$$

где K – общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды теплоотдачи, Вт/м \cdot °С; F – поверхность охлаждения проводника, см 2 .

Уравнение теплового баланса за время неустановившегося теплового процесса можно записать в следующем виде:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (5)$$

или

$$I^2 R_a dt = Gcd\Delta T + KF\Delta Tdt, \quad (6)$$

или

$$\frac{I^2 R_a}{Gc} = \frac{d\Delta T}{dt} + \frac{KF}{Gc}\Delta T. \quad (7)$$

Для условий нормального режима, когда температура проводника изменяется в небольших пределах, можно принять, что R , c , K представляют собой постоянные величины. Кроме того, следует учесть, что до включения тока проводник имел температуру окружающей среды, т. е. начальное превышение температуры проводника над температурой окружающей среды равно нулю.

Решение этого дифференциального уравнения нагрева проводника будет:

$$\Delta T = Ae^{-\frac{KF}{Gc}t} + \frac{I^2 R_a}{KF} \quad (8)$$

где A – постоянная интегрирования, зависящая от начальных условий.

При $t = 0$ $\Delta T = 0$, т. е. в начальный момент нагреваемый проводник имеет температуру окружающей среды.

Тогда для $t = 0$ получаем:

$$\Delta T = A + \frac{I^2 R_a}{KF} \text{ и } A = -\frac{I^2 R_a}{KF}. \quad (9)$$

Подставляя значение постоянной интегрирования A , получаем:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{I^2 R_a}{KF} (1 - e^{-\frac{KF}{Gc}t}). \quad (10)$$

Из этого уравнения следует, что нагрев токоведущего проводника происходит по экспоненциальной кривой. Как видно, с изменением времени подъем температуры проводника замедляется и температура достигает установившегося значения. Уравнение (10) дает температуру проводника в любой момент времени t с начала прохождения тока.

Величина установившегося перегрева может быть получена, если в уравнении нагрева принять время $t = \infty$:

$$\Delta T_y = T_y - T_0 = \frac{I^2 R_a}{KF}, \quad (11)$$

где T_y – установившаяся температура поверхности проводника; ΔT_y – установившееся значение превышения температуры проводника над температурой окружающей среды.

Таким образом, при постоянном токе 500 А, проходящем через плоскость припоя с параметрами 220×100×2 мм, предельное значение ΔT_y будет равным 24,35 °С. При этом данное значение разности температур соответствует бездефектному паяному соединению. Наличие несплошностей в паяном соединении будет способствовать увеличению температуры над зоной припоя (рис. 2).

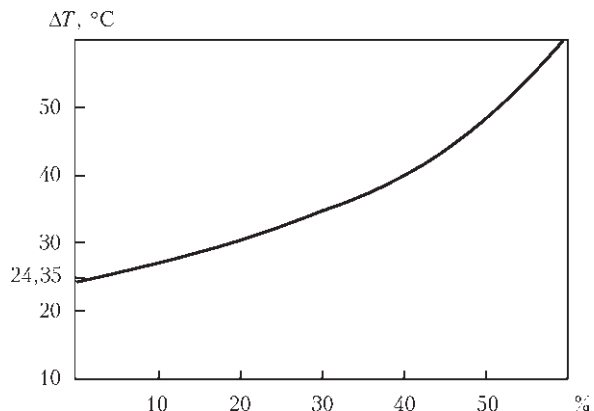


Рис. 2. Зависимость предельного значения разности температур ΔT_y в зоне припоя от процентной составляющей площади пусот в паяном соединении при токе 500 А

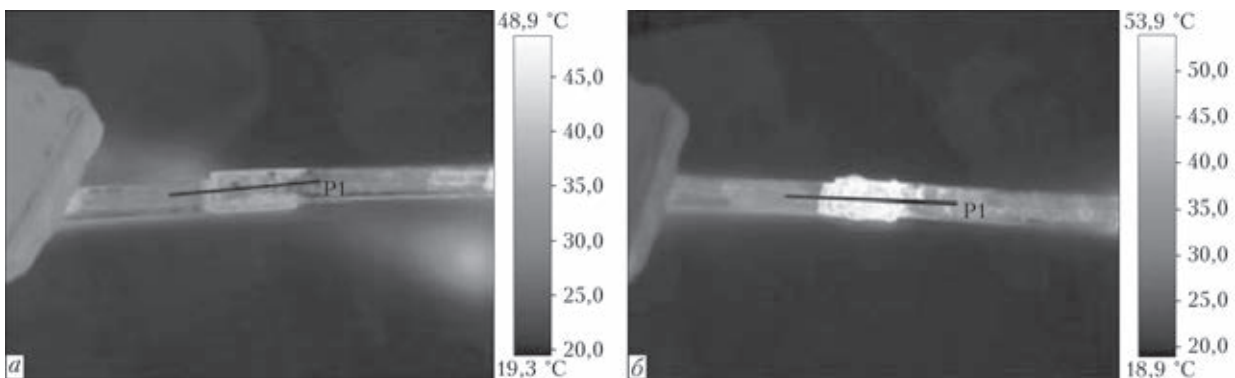


Рис. 3. Термограммы бездефектного (а) и дефектного (б) паяных соединений (P1 – линия распределения температуры)

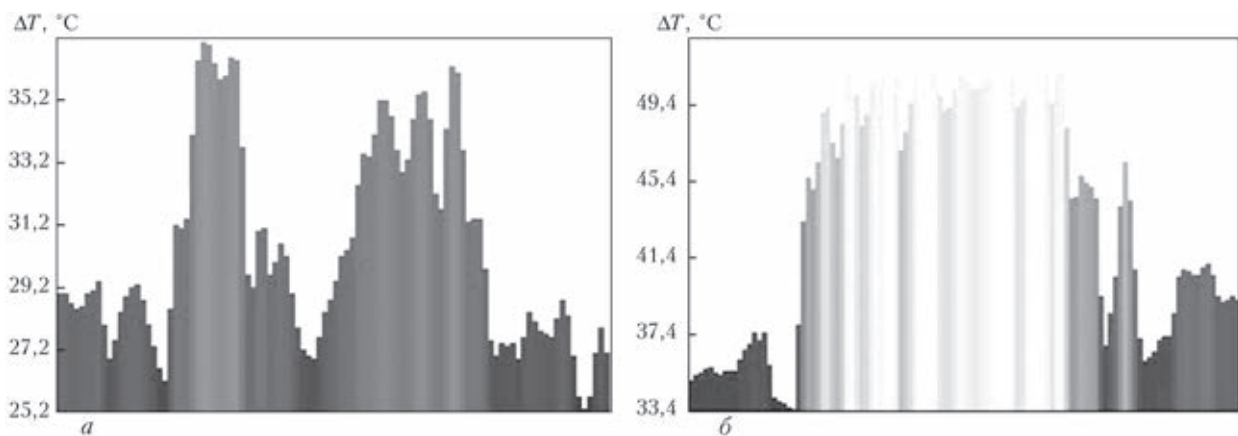


Рис. 4. Гистограммы температурного поля вдоль линии P1 бездефектного (а) и дефектного (б) паяных образцов: а – $T_{\min} = 25,2$ °С, $T_{\max} = 37,1$, $T_{\text{cp}} = 30,4$; б – $T_{\min} = 33,5$ °С, $T_{\max} = 52,6$, $T_{\text{cp}} = 44,1$

Предварительный тепловизионный контроль паяных соединений статорных обмоток электродвигателя проводили на специально изготовленных образцах, один из которых имел явные дефекты в виде локальных непропаев, термограммы которых представлены на рис. 3. Через паяные соединения пропускался переменный ток равный 500 А в течение 30 с. После чего проводилась термографическая съемка тепловизором марки TESTO 876.

Как видно из гистограмм (рис. 4), максимальная температура зоны спаивания в бездефектном соединении равна 37,1 °С при средней температуре медных токопроводов равной 27,2 °С. При этом ΔT для зоны спаивания 17,8 °С. Для дефектного пая максимальная температура равна 52,6 °С при средней температуре медных токопроводов равной 38,1 °С. Значение ΔT для дефектной зоны составляет 33,7 °С.

Выводы

Проведенные опытные испытания и предварительные расчеты показали, что при токе 500 А, проходящем через зону припоя, граничное значение

превышения температуры для бездефектного соединения составляет 24,35 °С (для соединения 220×100×2 мм).

Превышение граничного значения температуры для подобных паяных соединений будет свидетельствовать о наличии внутренних дефектов.

Применение тепловизионного контроля позволяет эффективно выявлять дефектные участки в паяных соединениях статорных обмоток электродвигателя на стадии производства и может быть основой для разработки методики контроля паяных соединений.

1. Калиниченко Н. П., Викторова М. О. Атлас дефектов паяных соединений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ин-та. – 2012. – С. 40–42.
2. ГОСТ 27471–87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения. – Гос. комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – С. 2.
3. Тепловизионный контроль паяных соединений статорных обмоток вращающихся машин / В. И. Завидей, В. А. Головичер, С. В. Милованов и др. // Энергетик. – 2008. – № 3. – С. 53–57.
4. Урлучич Ю. М., Данилин Н. С. Неразрушающий контроль паяных соединений в радиоэлектронной аппаратуре // Мир измерений. – 2010. – № 6. – С. 31–38.
5. ГОСТ 19738–74. Припой серебряные. Марки. – Межгосударств. стандарт, 1985. – С. 1–5.

The possibility of application of nondestructive heat monitoring for soldered joints of electric motor elements is considered. The main type of defect in soldered joints is presence of gas inclusions in the soldered joint zone that has a negative impact on service properties of the final product. To determine the possibility of conducting heat monitoring of soldered joints of rotor winding of electric motors, control samples were made, both defect free and with introduced defects. Soldering was performed by contact method with subsequent passage of electric current and by flow soldering. To determine the limit value of exceeding the soldered joint zone temperature, the main equation has been formulated, and respective mathematical calculations have been performed. Dependence of the value of temperature difference above the soldered joint zone on percentage of discontinuities inside the soldered joint has been derived. Experimental work has been conducted on heat monitoring of soldered joints, confirming the calculated temperature values. Comparative temperature histograms have been plotted for defectfree and defective joints. 5 References, 4 Figures.

Keywords: soldered joints, stator winding of electric motor, thermal imaging monitoring, thermal imager

Поступила в редакцию
25.03.2014



ХАРАКТЕР ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДУ В МІСЦІ ВСТАНОВЛЕННЯ ПІДСИЛЮЮЧИХ МУФТ

В. В. НІКОЛАЄВ

УМГ «Черкаситрансгаз». 18023, м. Черкаси, вул. Сумгаїтська, 3. E-mail: nikolaev-vv@utg.ua

Надійність безперебійної експлуатації магістральних трубопроводів є актуальною проблемою на етапі їх експлуатації. Розробка і застосування більш економічних і менш трудомістких способів відновлення несучої здатності трубопроводу, що виключають вирізку труб, а в певних ситуаціях і зупинку транспортування продукту, зміщується у бік ширшого використання муфтових технологій, що дозволяють виключити вирізки трубних котушок труб з дефектами. У ряді випадків ремонт з використанням муфт є безальтернативним методом. При цьому потрібно визначити та контролювати напружено-деформований стан в процесі проведення ремонтних робіт. Це є важливим етапом в комплексі заходів в рамках технічної діагностики стану лінійної частини магістральних газопроводів, в тому числі при їх подальшій експлуатації. Висвітлюються методики розрахунку НДС на окремих етапах проведення робіт, математична модель НДС ремонтної муфти при проведенні ремонту трубопроводу Ду1200. Бібліогр. 5, рис. 9.

Ключові слова: транспортування продукту, муфтові технології, напружено-деформований стан, технічна діагностика стану лінійної частини газопроводів

В Україні функціонує більш 40 тис. км магістральних трубопроводів, призначених для транспортування нафти і газу. Багато з них відпрацювали чверть століття і більше. Під впливом внутрішнього навантаження від транспортованих по них продуктів, зовнішнього середовища і режиму експлуатації поступово знижується несуча здатність трубопроводів, що неминуче призводить до їх зношення і вимагає ремонту дефектних ділянок, які з'являються в процесі довготривалої експлуатації, заміни цих ділянок трубопроводів на нові. В окремих випадках доводиться понижувати робочий тиск, який значно відрізняється від проектного, що, в свою чергу, призводить до зниження обсягів транспортування нафти чи газу.

Чималий вік трубопроводів об'єктивно пов'язаний зі збільшенням ризику аварій і відмов при експлуатації у разі відсутності ефективної системи їх попередження. Це, у свою чергу, вимагає розроблення нових і вдосконалених та енергоощадних методів ремонту. Впровадження в ГТС України внутрішньотрубної діагностики дозволило виявити значну кількість дефектів тіла труби, які загрожують безпечній експлуатації та потребують термінового ремонту.

Підвищення надійності трубопроводів тривалої експлуатації є актуальною проблемою на етапі їх експлуатації. Згідно зі статистичними даними кількість дефектів, що виявляються на всіх рівнях діагностики, становить від 1,5 до 2 тис. на рік. Більша частина дефектів (за статистикою близько три чверті) віддалена один від одного. Тому для їх усунення необхідно застосовувати вибірковий ремонт.

Традиційно для усунення таких дефектів застосовуються вогневі роботи із зупинкою транспортування газу чи нафти, з випуском газу із дільниці в атмосферу чи видаленням нафти та очищенням трубопроводу, що підлягає ремонту, вирізанням та вварюванням технологічної котушки. Це приводить до значних втрат газу чи нафти та невиконання плану транспортування, витрат на проведення самих вогневих робіт і т. п.

Зростаючі об'єми ремонту дефектних ділянок вимагають розробки і застосування більш економічних і менш трудомістких способів відновлення несучої здатності трубопроводу, що виключають вирізку труб, а в певних ситуаціях і зупинку транспортування продукту.

В останні 5–6 років акцент в світовій практиці методів ремонту в газовій промисловості зміщується у бік ширшого використання муфтових технологій, що дозволяють виключити вирізки трубних котушок труб з дефектами. У цілому ряді випадків ремонт з використанням муфт є безальтернативним методом. Наприклад, при витоках газу з порожнини трубопроводу або як тимчасовий захід при неможливості зупинити перекачування продукту. Для підсилення дефектних ділянок трубопроводу впроваджені та активно застосовується метод встановлення сталевих підсилюючих муфт із застосуванням дугового зварювання з послідуною герметизацією підмуфтового простору поліуретановою сумішшю.

Метод застосовується по рекомендаціях ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та згідно вимог ГБН В.3.1-00013741-12:2011 «Магістральні газо-



проводі. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації» [1].

Відновлюються дефектні ділянки як з локальними, так і зі значними протяжними пошкодженнями.

У технологічний цикл ремонту лінійної частини магістрального трубопроводу включається створення ремонтного котловану. При проведенні земляних робіт по розкопці трубопроводу, на відкритій ділянці трубопровід змінює своє проектне положення. Зміна прямолінійного, ненавантаженого згинаючими моментами розташування призводить до зміни напружено-деформованого стану трубопроводу. Це пов'язано з тим, що при виїмці ґрунту він провисає. Зміна температурного поля, у свою чергу, призводить до появи додаткових осьових зусиль, що діють на трубопровід. Крім того, змінюється податливість основи ґрунту на краях котловану.

СНіП 2.05.06–85 «Магістральні трубопроводи» регламентує перевірку на міцність підземних і наземних трубопроводів в поздовжньому напрямку та перевірку на неприпустимість пластичних деформацій.

У той же час після встановлення підсилюючої муфти в стінці трубопроводу, що примикає до муфти, виникає підвищення напружень в результаті дії граничного ефекту [2, 3].

СНіП 2.05.06–85 не дає прямих вказівок чи методичних рекомендацій щодо визначення напружень у найбільш навантаженому перерізі при встановленні ремонтної муфти з урахуванням зміни навантажень на ремонтній ділянці трубопроводу.

Для удосконалення методів розрахунку несучої здатності ділянок магістральних трубопроводів, які ремонтуються з використанням муфтових технологій, поставлені та вирішені наступні завдання:

- дослідження напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу в різні періоди проведення ремонтних робіт, які пов'язані із встановленням підсилюючої муфти;
 - побудова математичної моделі деформування двохшарової конструкції муфти при осесиметричному напруженні;
 - розробка методики розрахунку напружено-деформованого стану муфти при різних способах її встановлення на поверхні трубопроводу, що ремонтується;
 - оцінка міцності ділянки трубопроводу, яка відремонтована за муфтовою технологією.
- Об'єктом дослідження є ділянка трубопроводу при ремонтно-відновлювальних роботах.

В статті представлені:

- методика розрахунку трубопроводу в зоні ремонтного котловану при встановленні підсилюючої муфти;
- математична модель напружено-деформованого стану ремонтної муфти при осесиметричному напруженні;

– методика розрахунку напружено-деформованого стану та оцінка міцності ремонтної муфти та ділянки трубопроводу в зоні її встановлення.

В процесі дослідження визначається зміна напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу, що змінює своє проектне положення в результаті створення ремонтного котловану довжиною L (рис. 1).

Для вирішення поставленого завдання використано диференціальне рівняння поздовжньо-поперечного вигину ділянки трубопроводу, що лежить на пружній основі. Це рівняння представлено у вигляді:

$$EI(x) \frac{d^4 w}{dx^4} - N(x) \frac{d^2 w}{dx^2} + \alpha(x) w = q(x), \quad (1)$$

де w – прогин трубопроводу по вертикалі; E – модуль поздовжньої пружності; $I(x)$ – осьовий момент інерції перерізу; $N(x)$ – поздовжнє стискаюче зусилля; $\alpha(x)$ – коефіцієнт пропорційності, що визначається залежно від коефіцієнта постелі ґрунту $c(x)$ і ширини поверхні, що спирається (зовнішнього діаметра трубопроводу D): $\alpha(x) w = c(x) D a$; $q(x)$ – інтенсивність поперечного навантаження.

При цьому в основі опису жорсткості основи ґрунту використана модель Вінклера. Поперечні навантаження прийняті змінними уздовж осі трубопроводу, тобто $q(x)$ являє собою інтенсивність навантаження від власної ваги трубопроводу $q_1(x)$ та ваги ґрунту $q_2(x)$.

Рівняння (1) вирішено методом скінчених різниць (МКР). Обґрунтування достовірності отриманих результатів виконано шляхом порівняння результатів МКР з результатами аналітичних способів вирішення. Для цього загальне завдання розбиваємо на ряд окремих, які мають точне рішення:

- деформація ділянки трубопроводу тільки від дії поперечної сили;
- деформація ремонтної ділянки від дії поздовжньої сили;
- деформація ділянки трубопроводу, що лежить на пружній основі, від дії поперечної сили.

Розрахунки за окремими тестовими завданнями показали, що розбіжність по функції прогину w не перевищує 1,5 %.

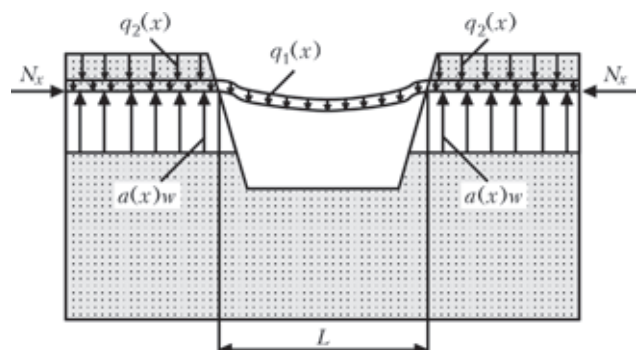


Рис. 1. Розрахункова схема ділянки трубопроводу, що лежить на пружній основі

Розроблена методика розрахунку ділянки трубопроводу дозволяє оцінити міцність в період проведення ремонтних робіт при різних жорсткостях характеристик основи ґрунту, розмірах ремонтного котловану, діючих на трубопровід вісьових зусиль.

Розрахунки проведені для трубопроводу діаметром $D = 1020$ мм, товщиною стінки труби $\delta = 12$ мм, робочим тиском $P = 5,5$ МПа, інтенсивністю поперечного навантаження від власної ваги трубопроводу $q_1 = 10$ кН/м, інтенсивністю поперечного навантаження від ваги ґрунту $q_2 = 17$ кН/м, при довжині ремонтного котловану $L = 10$ м. При різниці температур замикання трубопроводу та продукту, що перекачується, $\Delta t = 40^\circ$ осьове стискуюче навантаження становить $\sigma = 32$ МПа.

Моделювалася різна жорсткість основи ґрунту. При великій жорсткості ґрунту (скельний ґрунт, коефіцієнт постелі $c \geq 10000$ МН/м³) значення згинальних моментів на краях котловану більше, ніж у середині прольоту (рис. 2). При зменшенні значення коефіцієнта постелі напруження в середині прольоту стає більше, ніж на краях (пісок злежаний – $c \leq 50$ МН/м³, пісок утрамбований – $c \leq 100$ МН/м³).

Розрахункова ділянка трубопроводу включає ремонтний котлован, розташований в центральній зоні. Загальна розрахункова довжина трубопроводу була прийнята рівною трьом прольотам ремонтного котловану. Це дозволило відхилитись від граничного ефекту на краю розрахункової довжини трубопроводу.

Матеріал трубопроводу знаходиться в двохосьовому напруженому стані. Для розрахунку еквівалентного напруження з урахуванням кільцевого напруження від внутрішнього тиску використана енергетична теорія міцності.

На рис. 3 представлені результати розрахунку еквівалентного напруження для трубопроводу з діаметром 1020 мм, товщиною стінки труби $\delta = 12$ мм,

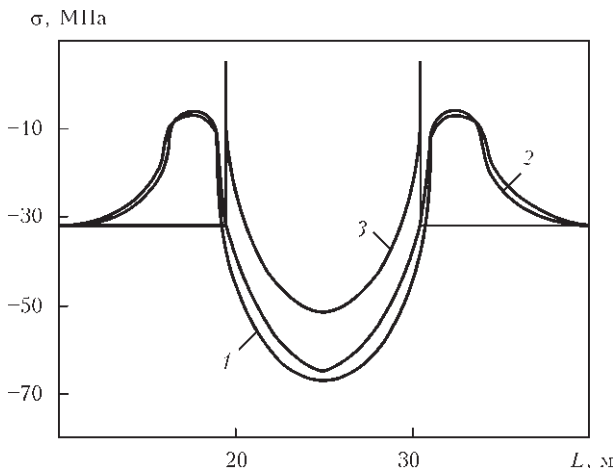


Рис. 2. Розподіл напружень при поздовжньо-поперечному вигині трубопроводу по довжині розрахункової ділянки в залежності від жорсткості основи ґрунту, МН/м³: 1 – $C = 100$; 2 – 200; 3 – ≥ 10000

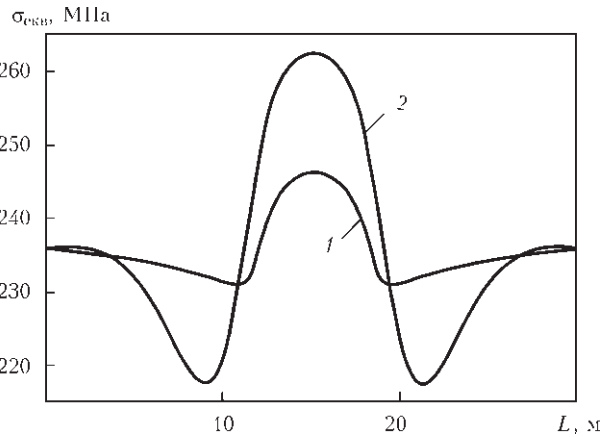


Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень при поздовжньо-поперечному вигині трубопроводу при довжині ремонтного котловану $L = 5$ (1) та 10 м (2)

коефіцієнтом постелі $c = 200$ МН/м³, робочим тиском $P = 5,5$ МПа. Значення напружень наведені для довжини котловану $L = 5$ та 10 м. Осьове стискуюче напруження $\sigma = 32$ МПа ($\Delta t = 40^\circ$).

Після виконання ремонтних робіт при поверненні трубопроводу у вихідне положення змінюється його напружений стан. У цьому випадку завдання поздовжньо-поперечного вигину ділянки трубопроводу вирішується за умови, що величина прогину в середній частині ліквідується за допомогою підйому труби в початкове положення.

Як показують розрахунки, при підйомі трубопроводу в центральній частині до проектного положення якісна картина і величини напружень від вигину змінюються (зменшуються), але в цілому не є нульовими на ділянці, що ремонтується.

Далі представлений варіант математичної моделі деформування двошарової конструкції композитної муфти (рис. 4), яка використана для відновлення пошкодженої ділянки трубопроводу.

У запропонованій математичній моделі вигин композитної муфти розглядається при осесиметричному навантаженні з урахуванням роботи міжшарових зв'язків. Представлена форма запису диференціальних рівнянь у переміщеннях. При цьому завдання розглянуто в лінійній постановці.

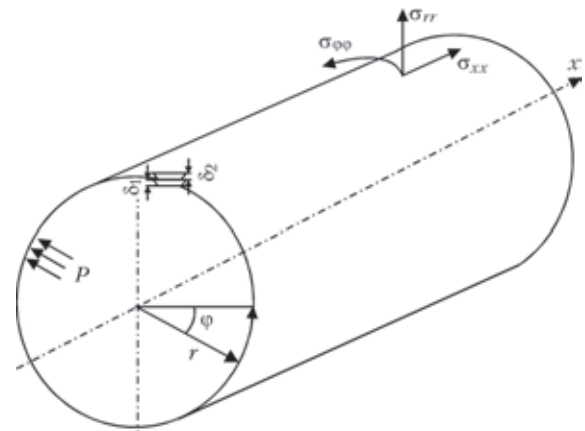


Рис. 4. Розрахункова схема конструкції двошарової композитної муфти та координати серединної поверхні



Отримані диференційні рівняння рівноваги складової двошарової композитної муфти з урахуванням жорсткості міжшарових зв'язків мають вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} \left(B_{11}^{(1)} \frac{du_0^{(1)}}{dx} \right) + \frac{d}{dx} \left(B_{12}^{(1)} w \right) \frac{1}{r} + p_x^{(1)} - \\ & - \eta \left(c \frac{dw}{dx} + u_0^{(2)} - u_0^{(1)} \right) = 0, \\ & \frac{d}{dx} \left(B_{11}^{(2)} \frac{du_0^{(2)}}{dx} \right) + \frac{d}{dx} \left(B_{12}^{(2)} w \right) \frac{1}{r} + p_x^{(2)} + \\ & + \eta \left(c \frac{dw}{dx} + u_0^{(2)} - u_0^{(1)} \right) = 0, \\ & \frac{d^2}{dx^2} \left(D_0 \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \left[\frac{du_0^{(1)}}{dx} B_{12}^{(1)} + \frac{du_0^{(2)}}{dx} B_{12}^{(2)} + \right. \\ & \left. + \frac{w}{r} \left(B_{11}^{(1)} + B_{11}^{(2)} \right) \right] \frac{1}{r} - \frac{d}{dx} \left[c \left(\eta c \frac{dw}{dx} + u_0^{(2)} - u_0^{(1)} \right) \right] = P, \end{aligned} \quad (2)$$

де η – коефіцієнт жорсткості зв'язків зсуву між шарами, який залежить від способу закріплення муфти (зварювання, м'яка прокладка) на поверхні трубопроводу, що ремонтується; $u_0^{(1)}, u_0^{(2)}$ – переміщення в серединних поверхнях труби і муфти уздовж твірної; w – поперечні зміщення точок серединної поверхні всього пакета; c – відстань між серединними поверхнями шарів, що лежать по обидві сторони шва; P – внутрішній тиск; B_{11}^i, B_{12}^i ($i = 1, 2$), D_0 – інтегральні характеристики жорсткості розтягування – стиснення і вигину.

Система рівнянь (2) є замкнутою і вирішується щодо трьох невідомих функцій $u_0^{(1)}, u_0^{(2)}$ і w .

Завдання вирішувалось МКР при кінцевій жорсткості міжшарових зв'язків з використанням відповідних операторів переходу від диференціальних рівнянь до дискретних.

Дослідження проводилися при використанні обжимної муфти, встановленої через м'які прокладки ($\eta = 0$), та для приварної муфти ($\eta = \infty$) при різних граничних умовах. Достовірність чисельних результатів обґрунтована шляхом порівняння з результатами, отриманими з наявного в літературі точного рішення осесиметричного деформування циліндричної одношарової оболонки.

Розміри конструкції двошарової композитної муфти складають: товщина стінок $\delta_1 = 12$ мм та $\delta_2 = 16$ мм, діаметр $D = 1020$ мм, довжина муфти $L_m = 2$ м. Характеристики жорсткості матеріалу: модуль поздовжньої пружності сталі $E = 210000$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$, внутрішній тиск $P = 5,5$ МПа.

При встановленні напівмуфт через пружний шар (нульова жорсткість міжслойованого зв'язку $\eta = 0$) має місце зсув по поверхні контакту з

трубопроводом. У цьому випадку гіпотеза прямих нормалей виконується тільки для кожного окремого шару.

Картина розподілу нормальних напружень уздовж твірної по довжині муфтового з'єднання показана у вигляді двох кривих (рис. 5). Це пов'язано з тим, що напруження в шарах труби і муфти при нульовій жорсткості міжшарових зв'язків різні.

За відсутності зсуву між шарами по поверхні контакту ($\eta = \infty$) має місце симетричний напружений стан щодо серединної поверхні пакета двох шарів.

Порівняння напружень в шарах конструкції показує, що при виконанні приварної муфти поздовжні напруження в трубопроводі збільшуються до 30 %. Тому для зменшення рівня напруженого стану муфтового з'єднання необхідно забезпечити максимальну податливість по поверхні контакту між трубопроводом і муфтою.

Вплив переміщень на крайках муфтової конструкції на рівень напружень зроблено без урахування внутрішнього тиску ($P = 0$). Виявлено, що переміщення кромки на 0,5 мм дає збільшення напруження до 140 МПа.

Також вирішена задача напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу, відновленого за муфтовою технологією з використанням попередньої методики. Була обрана ділянка трубопроводу, на якій значення товщини стінки муфти $\delta_2 = 16$ мм задавалася у вигляді масиву, де на ділянці труби поза муфтою $\delta_2 = 0$ мм. Товщину стінки трубопроводу приймали рівною $\delta_1 = 12$ мм. Діаметр труби $D = 1020$ мм, довжина муфти $L_m = 2$ м. Довжина ділянки трубопроводу $L = 5$ м вибрана з таким розрахунком, щоб характер закріплення трубопроводу на краях не впливав на граничний ефект на крайках муфти.

Результати розрахунку напружено-деформованого стану з урахуванням тільки вигину муфтового з'єднання від внутрішнього тиску представлені на рис. 5.

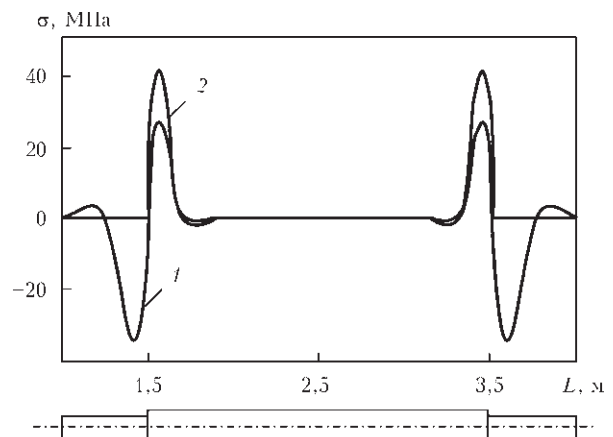


Рис. 5. Розподіл нормальних напружень вигину від внутрішнього тиску по довжині муфтової конструкції для обтискної муфти: 1 – стінка труби; 2 – стінка муфти

При встановленні ремонтної муфти вважаємо, що ремонтний тиск в трубопроводі знижений на 30 %. Після встановлення муфти тиск піднімається знову до робочого значення $P = 5,5$ МПа. При цьому тиску кільцеві напруження визначалися в стінках трубопроводу та ремонтній муфті.

Результати розрахунку еквівалентних та окружних напружень наведено на рис. 6.

Розвантажувальний ефект муфти становить 18,8 %, тобто напруження в трубі знижуються приблизно в 1,2 рази. У зоні примикання трубопроводу до країв муфти виникає напруження внаслідок граничного ефекту, що перевищує кільцеве напруження $\sigma_{\text{кп}}$ на 8,3 %.

Раніше було вирішено завдання в'яснення деформованого стану ділянки трубопроводу при капітальному ремонті з урахуванням основних параметрів і впливів. Також розглянуто напружено-деформований стан ремонтної муфти від внутрішнього тиску. Щоб оцінити загальний напружено-деформований стан ділянки трубопроводу, відремонтованої з використанням муфтової технології, використовуємо обидва ці рішення.

При цьому врахуємо, що поздовжні напруження визначаються двома факторами: від вигину самого трубопроводу при створенні ремонтного котловану і від внутрішнього тиску. Зміна еквівалентного напруження по довжині трубопроводу наведено на рис. 7.

Розрахунок виконаний при наступних параметрах: діаметр трубопроводу 1020 мм, товщина стінки труби $\delta_1 = 12$ мм, товщина стінки муфти $\delta_2 = 16$ мм, довжина муфти становить $L_m = 2$ м. Для розрахунку було обрано ділянку трубопроводу довжиною $L = 25$ м з довжиною ремонтного котловану $L_k = 5$ м. Робочий тиск $P_{\text{роб}} = 5,5$ МПа, ремонтний $2/3 P_{\text{роб}}$. Осьове стискує напруження $\sigma = 32$ МПа ($\Delta t = 40^\circ$). У результаті встановлення муфти значення еквівалентних напружень у тілі трубопроводу, що примикає до країв муфти, зросли на 19,3 %.

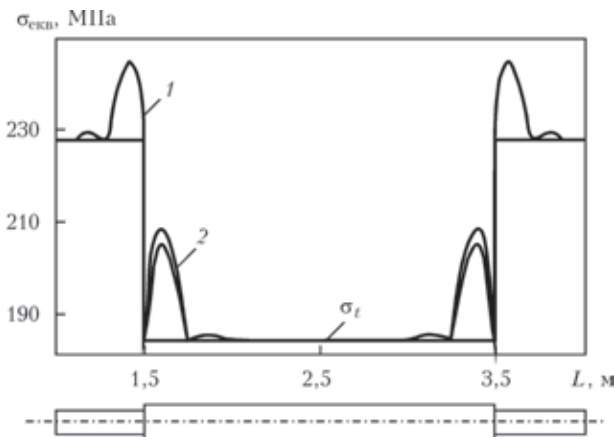


Рис. 6. Розподіл еквівалентних і кільцевого напружень по довжині муфтової конструкції для обтискової муфти: 1 – стінка труби; 2 – стінка муфти

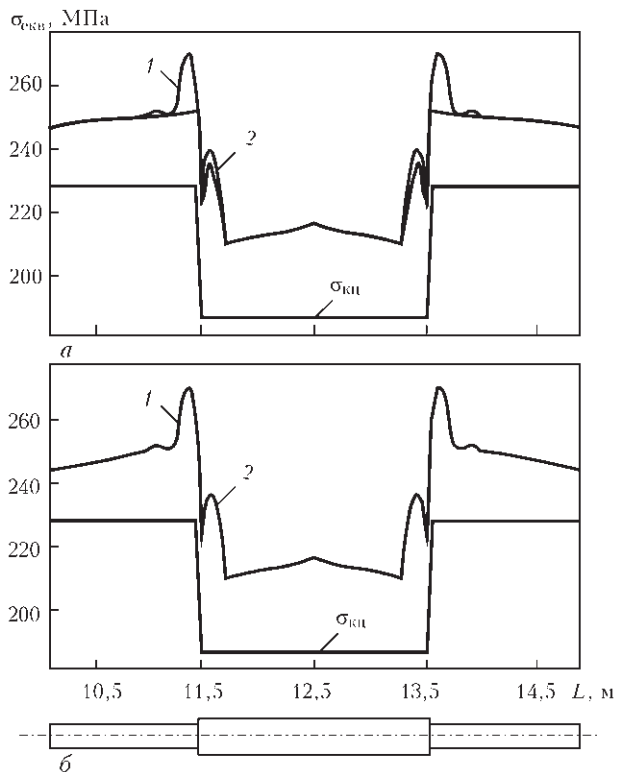


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень вздовж осі трубопроводу для обтискової (а) та приварної (б) муфти: 1 – стінка труби; 2 – стінка муфти; $\sigma_{\text{кп}}$ – кільцеве напруження

Величина цього напруження буде рости зі збільшенням довжини ремонтного котловану і величини осьового зусилля стиснення трубопроводу, тому що буде зростати складова напруження поздовжньо-поперечного вигину [4].

Оцінку міцності відремонтованої ділянки трубопроводу виконуємо, виходячи із загальних принципів безпеки робіт технічних пристроїв залежно від категорії ділянки, ступеня деградації металу труб, ступеня небезпечності дефектів труб.

Еквівалентне напруження не повинно перевищувати таких значень:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{екв}} &\leq R_y = (0,72 \dots 0,95) \sigma_T, \\ \sigma_{\text{екв}} &\leq R_u = (0,45 \dots 0,5) \sigma_B, \end{aligned} \quad (3)$$

де R_y – розрахунковий опір матеріалу труби по межі плинності σ_T ; R_u – розрахунковий опір матеріалу труби по тимчасовому опору σ_B .

Значення еквівалентних напружень для трубопроводу діаметром 1020 мм, товщиною стінки труби $\delta_1 = 12$ мм, матеріалом труби – сталь 17Г1С наступні: $\sigma_{\text{екв}} = 272$ МПа; $\sigma_{\text{екв}}/R_y = 0,72$ МПа; $\sigma_{\text{екв}}/R_u = 0,5$ МПа.

Величина еквівалентного напруження буде змінюватися в залежності від довжини ремонтного котловану (рис. 8). Гранична довжина котловану буде визначатися за умови неперевикнення $\sigma_{\text{екв}}$ значень розрахункових опорів R_y та R_u [5].

Розрахунки показують, що встановлення ремонтної муфти розвантажує стінку трубопроводу під муфтою на 22 %. У той же час встановлення

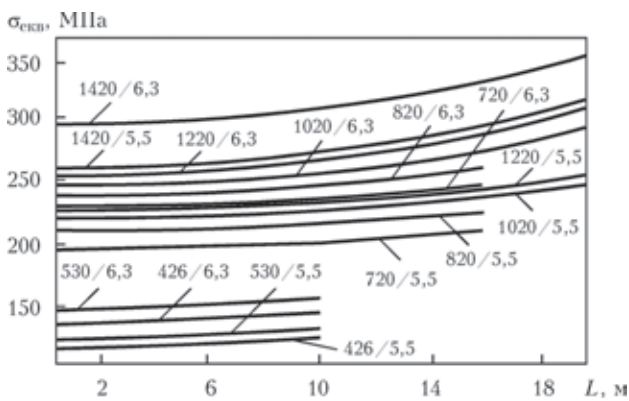


Рис. 8. Зміна еквівалентних напружень в стінці трубопроводу біля кромки муфти в залежності від довжини котловану (діаметр трубопроводу перед косою, за нею – величина робочого тиску) муфти призводить до зростання напруження на 26 % у зоні, що примикає до кромки муфти.

Висновки

Розроблена методика розрахунку ділянки трубопроводу дозволяє оцінити його міцність в період проведення ремонтних робіт при різних жорсткісних характеристиках основи ґрунта, довжині ремонтного котловану і діючих осьових зусиль.

Для приварної муфти напруження вздовж твірної від вигину на 30 % більше у порівнянні з обтисковою муфтою, де закріплення здійснюється через м'яку прокладку.

Reliability of continuous operation of the main pipelines is an urgent problem at their service stage. Development and application of more cost-effective and less labour-consuming methods to restore pipeline load-carrying capacity that eliminate pipes cutting out, and in certain situations also interruption of product transportation, is shifting towards wider application of coupling technologies that eliminate cutting out pipe coils from pipes with defects. In a number of cases of repair coupling application is a no-alternative method. Here it is necessary to determine and monitor the stress-strain state (SSS) during repair performance. It is an important stage in the package of measures for technical diagnostics of main gas pipeline linear part, also during their further service. Procedures of SSS calculation at individual stages of work performance, and mathematical model of SSS of a repair coupling at repair of Dn 1200 pipeline are described. 5 References, 9 Figures.

Keywords: product transportation, coupling technologies, stress-strain state, technical diagnostics of gas pipelines linear part.

Надійшла до редакції
20.09.2013 р.

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

Журнал «Автоматическая сварка» издается с 1948 г. 12 выпусков в год, ISSN 005-111X. Один из наиболее авторитетных и популярных журналов, издаваемых в СНГ, в области сварки и родственных процессов. Журнал «The Paton Welding Journal» издается с 2000 г. 12 выпусков в год, ISSN 0957-798X. Полный перевод журнала «Автоматическая сварка» на английский язык.

Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» издается с 1985 г. 4 выпуска в год, ISSN 0235-3474. В журнале публикуются статьи по технической диагностике сооружений, конструкций и машин, а также по всем методам неразрушающего контроля. Журнал переиздается в полном объеме на английском языке под названием «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» издательством «Cambridge International Science Publishing», Великобритания.

Журнал «Современная электрометаллургия» издается с 1989 г. 4 выпуска в год, ISSN 0235-3474. Журнал не имеет аналогов в СНГ. Журнал включает разделы: электрошлаковый переплав, электронно-лучевые процессы, плазменно-дуговые процессы, вакуумно-индукционная плавка, общие вопросы металлургии, новые материалы. Журнал переиздается в полном объеме на английском языке под названием «Advances in Electrometallurgy» издательством «Cambridge International Science Publishing», Великобритания.



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. В. РЕМНЕВА, И. Ф. ПОГРЕБНЯК, А. В. ШАРКО

Херсон. нац. техн. ун-т. 73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24. E-mail: kfte@tlc.kherson.ua

Исследована эффективность методов сегментации радиографических изображений сварных соединений, основанных на вычислении оценки сходимости результатов и заключений экспертов. Определены перспективы использования алгоритма нечеткой кластеризации системы автоматического анализа изображений при радиографическом контроле сварных соединений. На основе результатов экспериментальных исследований показано, что наиболее приемлемым методом сегментации радиографических изображений сварного шва является метод нечеткой кластеризации *S*-средних. Полученные результаты могут быть использованы при создании программного обеспечения для автоматизированного анализа результатов неразрушающего контроля сварных швов. Это позволит повысить качество контроля сварных соединений и сократить временные затраты на его проведение. Библиогр. 19, рис. 1, табл. 1.

Ключевые слова: радиография, сегментация, изображение, критерии, качество, оценки

Радиографический метод контроля является основным методом неразрушающего контроля сварных соединений, получившим наибольшее распространение в связи с простотой, наглядностью и документальным подтверждением результатов испытаний. Радиографический контроль применяют для выявления трещин, непроваров, прожогов, подрезов, пор, шлаковых включений, а также для оценки величины выпуклости и вогнутости корня шва, недоступных для внешнего осмотра [1].

Для обеспечения высокой точности выявления дефектов и оценки их параметров, уменьшения времени контроля и снижения требований к квалификации оператора используют системы автоматизированного анализа и сегментации изображений. Так как наибольший объем всех возникающих ошибок связан с некорректной локализацией областей снимков, содержащих дефекты, разработка эффективных методов сегментации радиографических изображений сварного шва является актуальной.

Вопросам сегментации радиографических изображений сварных соединений посвящено достаточно много работ [2–12]. В работе [2] для обнаружения дефектов сварного шва использовали метод водораздела; методы сегментации для выделения дефектов сварных соединений, основанные на пороговой обработке, рассмотрены в работах [3, 4], в работе [5] для обнаружения дефектов использовали метод нечеткой кластеризации. Методы выделения границ с использованием фильтров Собеля, Превитта, Робертса, Лапласиана Гауссиана и Канны рассмотрены в работах [6, 7]. В работе [8] исследовано применение метода Оцу для обнаружения дефектов сварных соединений. Сегментация изображений, основанная на областях, использована

в работах [9, 10]. В работе [11] для обработки изображений предлагается использовать кластеризацию методом *K*-средних. Метод сегментации изображений, основанный на процедуре «среднего сдвига», рассматривается в работе [12].

Многообразие алгоритмов сегментации радиографических изображений, их достоинства, недостатки, трудности использования области применения и выполненных на их основе оценок их эффективности составляет одну из нерешенных задач технической диагностики и неразрушающего контроля металлопродукции.

Целью работы является разработка и исследование методов количественной оценки эффективности сегментации радиографических изображений сварных соединений.

Для количественной оценки качества сегментации радиографических изображений были использованы критерии, основанные на вычислении меры отличия результатов сегментации и истинной формы объектов изображений.

Критерий FOM (Figure of Merit), соответствующий расстоянию между идеальным контуром I_t и контуром, полученным в результате сегментации I_s :

$$FOM(I_t, I_s) = \frac{1}{\max\{card(I_t), card(I_s)\}} \times \sum_{i=1}^{card(I_s)} \frac{1}{1+d^2(i)}, \quad (1)$$

где $card(I_t)$ – количество пикселей в множестве I_t ; $card(I_s)$ – количество пикселей в множестве I_s ; $d(i)$ – расстояние между i -м пикселем I_s и ближайшим к нему пикселем в I_t [13].

Критерий RMS (Root Mean Squared Error), основанный на вычислении среднеквадратичной ошибки:



$$RMS(I_1, I_2) = \left[\frac{1}{card(X)} \sum_{x \in X} (I_1(x) - I_2(x))^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где $I_i(x)$ – интенсивность пикселя x в изображении I_i ; X – множество пикселей на сегментируемом изображении [13].

Критерий RI (Rand Index), определяемый выражением:

$$RI = \frac{a+b}{a+b+c+d} = \frac{a+b}{\binom{n}{2}}. \quad (3)$$

Если $S = \{O_1, \dots, O_n\}$ – множество пикселей, $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ и $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$ два результата сегментации, то a – количество пар элементов в S , которые отнесены к одному подмножеству в X и Y ; b – количество пар элементов в S , которые отнесены к разным подмножествам в X и Y ; c – количество пар элементов в S , которые отнесены к одному и тому же подмножеству в X и к разным подмножествам в Y ; d – количество пар элементов в S , которые отнесены к разным подмножествам в X и к одному и тому же в Y [14].

Критерий GCE (Global Consistency Error), в котором глобальная ошибка несовместимости вычисляется по формуле:

$$GSE(S, S') = \frac{1}{N} \times \min \left\{ \sum_i LRE(S, S', x_i), \sum_i LRE(S', S, x_i) \right\}, \quad (4)$$

где $LRE(S, S', x_i) = \frac{|C(S, x_i) \setminus C(S', x_i)|}{|C(S, x_i)|}$ – два ре-

зультата сегментации; $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ – пиксели на результатах сегментации; $C(S, x)$ обозначает сегмент в S , содержащий пиксель x_i ; $C(S', x)$ – сегмент в S' , содержащий пиксель x_i [15].

Критерий VI (Variation of Information), который определяется выражением:

$$VI(C, K) = H(C | K) + H(K | C), \quad (5)$$

где $H(C | K) = - \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{c=1}^{|C|} \frac{a_{ck}}{N} \log \frac{a_{ck}}{\sum_{c=1}^{|C|} a_{ck}}$;

$H(K | C) = - \sum_{c=1}^{|C|} \sum_{k=1}^{|K|} \frac{a_{ck}}{N} \log \frac{a_{ck}}{\sum_{k=1}^{|K|} a_{ck}}$; N – количество

пикселей; $C = \{c_i | i = 1, \dots, n\}$ и $K = \{k_j | j = 1, \dots, m\}$ – два варианта сегментации изображения; a_{ij} – количество пикселей, которые являются членами класса c_i и элементами класса k_j [16].

Критерий BDE (Boundary Displacement Error) – средняя ошибка смещения граничных пикселей одного результата сегментации от ближайших граничных пикселей другой сегментации [17]. Критерий определяется выражением

$$\mu_{LA}(u, v) = \begin{cases} \frac{u-v}{L-1} & 0 < u-v, \end{cases} \quad (6)$$

где $\mu_{LA}(u, v)$ – функция принадлежности, которая описывает нечеткое отношение.

В случае сегментации изображения, когда границы построенного разбиения совпадают с границами эталонных объектов, значения критериев FOM и RI должны стремиться к единице, а значения критериев RMS, GCE, VI и BDE – к нулю.

Рассмотрены методы сегментации изображений: выделения границ (с использованием фильтров Собеля, Превитта, Робертса, Лапласиан Гуссиана и Канни), методы пороговой обработки (адаптивной и метод Оцу), метод выращивания областей, метод разделения и слияния областей, методы кластеризации (K -средних, нечеткой кластеризации C -средних, среднего сдвига) и метод водораздела [2–12].

Исследование методов сегментации проводилось на 50 радиографических изображениях сварных соединений, содержащих дефекты различного типа. Для моделирования работы приведенных алгоритмов сегментации использовали среду MatLab. Результаты работы алгоритма сравнивали с сегментацией, выполненной экспертом в ручном режиме с помощью графической системы Photoshop. На рисунке приведен пример исходного радиографического изображения сварного шва (*a*) и результатов его сегментации алгоритмами Собеля (*b*), Превитта (*в*), Робертса (*г*), Лапласиан Гуссиана (*д*), Канни (*е*), адаптивной пороговой обработки (*ж*), Оцу (*з*), выращивания областей (*и*), разделения и слияния областей (*к*), K -средних (*л*), нечеткой кластеризации C -средних (*м*), среднего сдвига (*н*), маркерного водораздела (*о*).

В таблице представлены средние значения выбранных критериев для различных методов сегментации.

В таблице фоном выделены те ячейки, значения которых являются наилучшим результатом сегментации с точки зрения каждого критерия.

Полученные данные подвергали статистической обработке. Проверку нормальности распределения исследуемых данных проводили с использованием критерия Колмогорова–Смирнова [18]. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез p принимался равным 0,05. В связи с тем, что все данные имели распределения, отличные от нормального, для проверки гипотезы о равенстве средних значений применялся непараметрический критерий Кру-

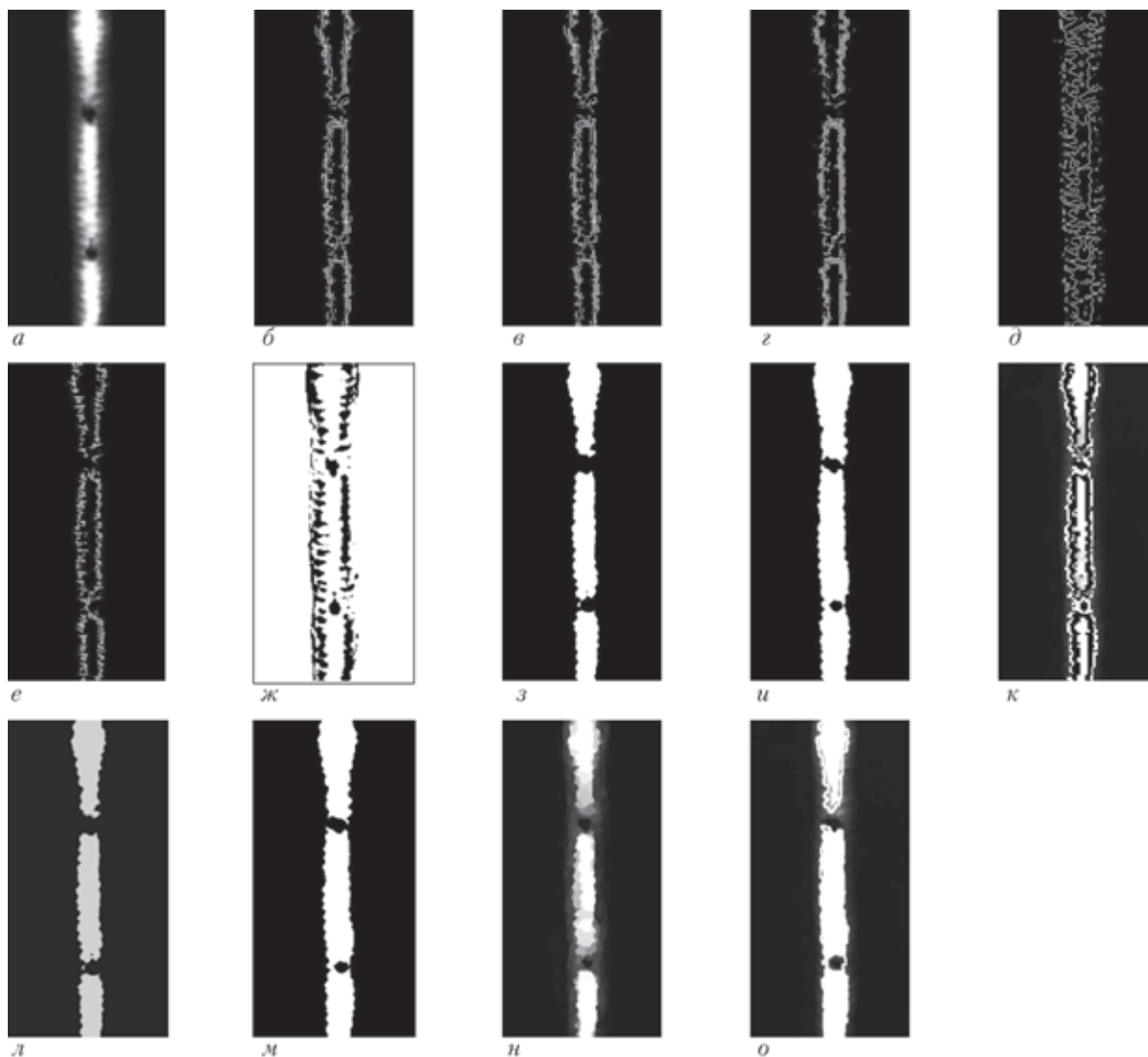


Рисунок. Данные для проведения вычислительного эксперимента (описание а–о см. в тексте)

Результаты сравнительного анализа

Методы	Критерии					
	FOM	RMS	RI	GCE	VI	BDE
Собея	0,3975	0,3536	0,7812	0,0482	0,6731	2,7214
Превитта	0,4005	0,3514	0,7835	0,0477	0,6643	2,5038
Робертса	0,4047	0,3417	0,7938	0,0620	0,6775	2,1863
Лапласиан Гауссиана	0,3339	0,3687	0,7651	0,0675	0,7605	2,8061
Канни	0,4122	0,3523	0,7826	0,0465	0,6632	2,5642
Адаптивной пороговой обработки	0,2920	0,9101	0,7156	0,1813	1,0314	3,2973
Оцу	0,5293	0,1727	0,9421	0,0488	0,3134	1,7840
Выращивания областей	0,5937	0,1456	0,9585	0,0382	0,2580	1,9528
Разделения и слияния областей	0,3744	0,3010	0,8352	0,1067	0,6989	5,2764
К-средних	0,4823	0,2391	0,8922	0,0728	0,4748	9,5858
Нечеткой кластеризации С-средних	0,6288	0,1410	0,9610	0,0372	0,2574	8,4991
Среднего сдвига	0,3051	0,1886	0,9314	0,0548	0,3454	2,9388
Маркерного водораздела	0,3188	0,2381	0,9532	0,0444	0,2974	6,1671

скала–Уоллиса [19]. Если вычисленное значение критерия оказывалось больше критического, различия признавались статистически значимыми.

Проверка гипотезы показала, что различия между средними значениями критериев RI и BDE не являются статистически значимыми, поэтому

данные критерии нецелесообразно использовать при сравнительном анализе методов сегментации радиографических изображений. Таким образом, выбор наилучшего алгоритма рекомендуется проводить с помощью критериев FOM, RMS, GCE и VI. Согласно таблице оптимальные значения данных критериев соответствуют методу нечеткой кластеризации С-средних.

Эффективность данного метода обусловлена присутствием в радиографических изображениях шума и нечетких границ дефектов.

Выводы

На основе полученных результатов экспериментальных исследований наиболее приемлемым



методом сегментации радиографических изображений сварного шва является метод нечеткой кластеризации С-средних.

Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что самыми эффективными критериями для оценки качества сегментации радиографических изображений являются FOM, RMS, GCE и VI. Использование критериев RI и BDE для этой цели не рекомендуется.

Полученные результаты могут быть использованы при создании программного обеспечения для автоматизированного анализа результатов неразрушающего контроля сварных швов. Это позволит повысить качество контроля сварных соединений и сократить временные затраты на его проведение.

1. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 19 с.
2. Alaknanda, Anand R. S., Kumar P. Flaw detection in radiographic weldment images using morphological watershed segmentation technique // NDT & E Int. – 2009. – 42(1). – P. 2–8.
3. Image thresholding for weld defect extraction in industrial radiographic testing / N. Nacereddine, L. Hamami, M. Tridi, N. Oucief // Intern. J. of Information and Communication Eng. – 2007. – 3, № 4. – P. 257–265.
4. Исследование алгоритмов сегментации рентгенотелевизионных изображений сварных швов для автоматического обнаружения дефектов / Я. П. Лазоренко, Е. В. Шаповалов, Т. Г. Скуба и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2009. – № 4. – С. 37–42.
5. A density-based fuzzy clustering technique for non-destructive detection of defects in materials / P. R. Reza Hasanzadeh, A. H. Rezaie, S. H. H. Sadeghi et al. // NDT&E Int. – 2007. – Vol. 40. – P. 337–346.
6. Wafaa Al-Hameed, Mayali Y., Picton P. Segmentation of radiographic images of weld defect // J. of Global Research in Computer Science. – 2013. – 4, №7. – P. 1–4.

Effectiveness of the methods of segmentation of welded joint radiographic images based on calculation of assessment of convergence of results and expert evaluations was studied. Prospects for application of the algorithm of fuzzy clustering of the system of automatic analysis of images at radiographic inspection of welded joints were determined. Proceeding from the results of experimental investigations, it is shown that the method of fuzzy clustering of C-averages is the most acceptable method of segmentation of radiographic images of the weld. Obtained results can be used in development of software for automated analysis of weld NDT results. This will allow improvement of the quality of weld NDT and reducing the time consumption for its performance. Ref. 19, Figures 1, Tables 1.

Keywords: radiography, segmentation, image, criterion, quality, evaluations

7. Faramarzi F., Motamedi M. Image processing for radiographic films of weld inspection // Proceedinds of the Intern. Conf. on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition. – 2011. – 1. – P. 337–343.
8. Non-parametric histogram-based thresholding methods for weld defect detection in radiography / N. Nacereddine, L. Hamami, M. Tridi, N. Oucief. // Intern. J. of Electrical, Electronic Sci. and Eng. – 2007. – 1, № 9. – P. 159–163.
9. Vaithiyathan V., Raj A., Venkatraman B. PCA and clustering based weld flaw detection from radiographic weld images // Intern. J. of Eng. and Technology. – 2013. – 5, №3. – P. 2878–2883.
10. Chaudhuri D., Agrawal A. Split-and-merge procedure for image segmentation using bimodal detection approach // Defence Sci. J. – 2010. – 60, № 3. – P. 290–301.
11. Pushpa R. Suri, Mahak. Image segmentation with modified K-means clustering method // Intern. J. of Recent Technology and Eng. (IJRTE). – 2012. – 1, № 2. – P. 176–180.
12. D. Comaniciu, P. Meer. Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2002. – 24, № 5. – P. 3–619.
13. Zhang Y. J. Advances in image and video segmentation. – IBM Press, 2006. – 473 p.
14. Rand W. Objective criteria for the evaluation of clustering methods // J. of the American Statistical Association. – № 6(336). – P. 846–850.
15. Unnikrishnan R., Pantofaru C., Hebert M. Toward objective evaluation of image segmentation algorithms // IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence. – 2007. – 29, № 6 – P. 929–944.
16. Rosenberg A., Hirschberg J. V-measure: A conditional entropy-based external cluster evaluation measure // Proc. of the 2007 Joint Conf. on Empirical Methods in Natural Languages Processing and Computational Natural Language Learning. – Prague, June 2007. – P. 410–420.
17. Yet another survey on image segmentation: Region and boundary information integration / J. Freixenet, X. Munoz, D. Raba et al. // ECCV. – 2002. – P. 408–422.
18. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М: Наука, 1983. – 416 с.
19. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М: Физматлит, 2006. – 816 с.

Поступила в редакцию
15.03.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ. В. Н. Сидорец, И. В. Пентегов. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с. Твердый переплет, 165×235 мм.

Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы. Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам. ISBN 978-966-96309-0-2.



АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ТОПОЛОГІЇ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ

О. Ю. ПОВСТЯНОЙ, В. Д. РУДЬ, Ю. А. МЕЛЬНИК, Н. Ю. ІМБІРОВИЧ

Луцьк. нац. техн. ун-т. 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56. E-mail: povstjanoj@mail.ru

Аналіз сучасних світових літературних джерел показав, що макроскопічна поведінка матеріалу безпосередньо залежить від особливостей його мікроструктури. Кількісний підхід при аналізі дозволяє виявити ту оптимальну структуру, яка в найбільшій мірі відповідає умовам служби матеріалу. Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві сьогодні. В даній статті наведено комплексний аналіз сучасних оптичних методів досліджень мікро- та макроповерхонь матеріалів. Показано можливості та оцінку сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження при обробці металографічних зображень. Висока роздільна здатність та особливо велика глибина фокуса, простота підготовки об'єктів досліджень, широкі можливості елементного аналізу при використанні різних систем реєстрації рентгенівського випромінювання дозволяють успішно використовувати методи мікро- та макрофрактографічного аналізу у матеріалознавчих дослідженнях для вивчення структури та елементного складу поверхонь зношування, тертя, руйнування, корозії, хімічної взаємодії, включень. Цифрова обробка зображень дозволяє суттєво збільшити можливості проведення мікроскопічних досліджень. *Бібліогр.* 25, рис. 7.

Ключові слова: фрактографія, топологія поверхонь, електронна мікроскопія, металографічні зображення, мікроструктура

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки і методів цифрової обробки зображень останнім часом дав можливість значно розширити автоматизацію науково-дослідних робіт в багатьох областях науки і техніки. Макроскопічна поведінка матеріалу безпосередньо залежить від особливостей його мікроструктури. Кількісний підхід при аналізі дозволяє виявити ту оптимальну структуру, яка в найбільшій мірі відповідає умовам служби матеріалу.

Вивчення структурних характеристик металів і сплавів – одна з ключових задач сучасного матеріалознавства, на основі якої базується процес створення нових та покращення властивостей вже існуючих матеріалів. Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві сьогодні.

В ХХІ ст. впровадження сучасних інформаційних технологій вимагає вдосконалення багатьох традиційних систем обробки та аналізу інформації. Для виробничого контролю вже недостатньо двовимірних характеристик на основі параметрів шорсткості, необхідним є комплексний тривимірний опис. Одним із ключових моментів сучасного матеріалознавства є мікротопографія, яка включає врахування статистичних характеристик матеріалів.

Для тривимірної інтерпретації мікрооб'єктів розроблена низка різноманітних методів [1–4].

Поряд з класичними контактними методами, які раніше були основними для визначення параметрів і тим самим якостей мікроповерхонь, сюди відносяться численні методи з області оптичної мікроскопії. Для значних збільшень використовуються методи растрово-електронної та скануючої зондової мікроскопії, які з високою роздільною здатністю дозволяють виконувати дослідження на атомарному рівні [5]. Фотограмметричні методи можна використовувати для просторового аналізу мікрофотографій і знімків електронно-світлових та електронних мікроскопів. Водночас для оптичних досліджень поверхонь вже давно є безліч різноманітних модифікованих методів [6–10].

Сучасні методи дослідження 3D-геометрії об'єктів (рис.1) можна розділити на два великих класи – контактні (координатно-вимірвальні машини, щупові прилади, контактні профілометри) і безконтактні, серед яких найбільш поширеними є методи світлового перерізу, стереоскопічні, інтерференційні і растрові методи. До безконтактних методів належать також і фотограмметричні методи.

Контактні методи вимірювання. Прилади, які базуються на контактних методах вимірювання (профілометр, профілографи) використовуються порівняно тривалий час. Класичною технікою для тривимірного вимірювання мікроповерхонь є контактний (профільний) метод [11]. При цьому поверхня зразка сканується за окремими профілями алмазною голкою, після чого окремі профілі в своїй сукупності відображають модель поверхні, з



Рис. 1. Сучасні методи дослідження 3D-геометрії об'єктів якої можна визначити, наприклад, 3D-шорсткість (рис. 2).

Точність методу залежить як від точності позиціонування об'єктного столика і вимірювальної системи, так і від радіуса вістря голки, який зазвичай становить від 5 до 0,1 мкм [1, 6]. Через закруглення вістря голки відбувається згладжування вимірювань, оскільки менші нерівності від діаметра вістря не можна охопити. Це метод, який переважно використовується для вимірювання шорсткості поверхні, і, попри високу надійність, має певні обмеження.

Безконтактні методи вимірювання. Багато задач промислового контролю та проектування вимагають отримання даних про геометричні форми об'єктів у тривимірному просторі. Для вирішення цих задач широко застосовуються безконтактні методи вимірювань, серед яких найбільш успішними є оптичні методи.



Рис. 2. Профілограф-профілометр для визначення шорсткості та хвилястості поверхонь

До методів вимірювання, що працюють у безконтактному режимі, відносять проекційні методи, інтерферометричні та методи скануючої електронної мікроскопії [12, 13]. Технології, які відносяться до цих методів, значною мірою залучаються також для визначення топографії поверхні в окремих мікрообластях (рис. 3).

Водночас деякі методи скануючої зондової мікроскопії дозволяють відтворювати мікротопографію в нанометровому діапазоні, методи електронної мікроскопії дають можливість отримувати просторову інформацію про мікроструктуру (рис. 4).

В останні роки набули значного поширення методи вимірювання форми поверхні, які базу-

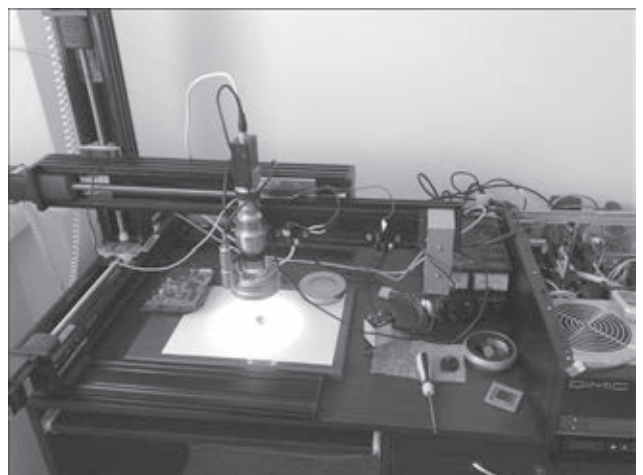


Рис. 3. Загальний вигляд модульного комплексу оптичного аналізу зображень Dimic 1000

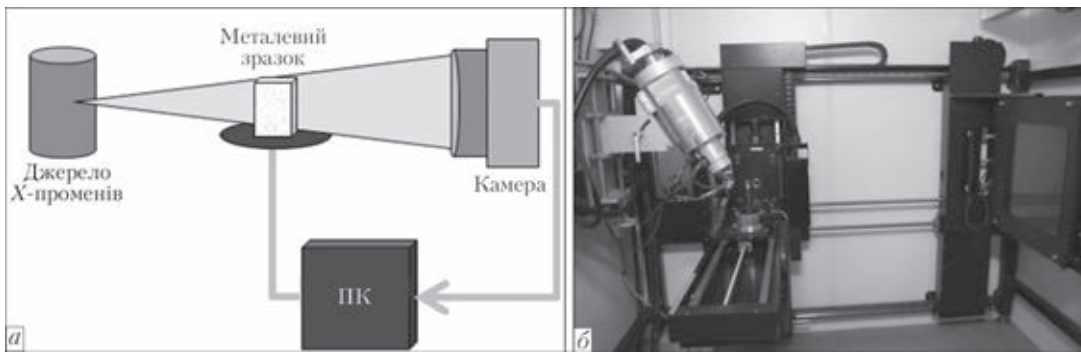


Рис. 4. Принципова схема (а) та томограф X-ТЕК 225/230 kV СТ (б)

ються на фазових вимірах. Серед них найбільш відомими є:

- профілометрія методом фазових кроків (Phase Shifting Profilometry);
- профілометрія методом Фур'є-перетворень (Fourier Transform Profilometry).

В цих методах використовується спеціальний вид освітлення об'єктів, так зване структуроване світло. На досліджувану дифузно-відображувальну поверхню проектується періодична структура, часто у вигляді системи паралельних чорно-білих напівтонових чи кольорових смуг. Відображене від об'єкта світло використовується для побудови зображення. Якщо напрямки проєкціонування смуг та реєстрації зображення об'єкта не співпадають, то через паралакси висхідна регулярна система смуг спотворюється і зображення об'єкта нагадує інтерферограму, отриману в полосах максимальної ширини, так званий муаровий ефект [14, 15].

Інтерферометричні методи. Вимірювання рельєфу поверхні оптичними безконтактними методами в автоматичному режимі з високою точністю є важливим завданням при контролі продукції промислового виробництва. Сучасна інтерференційна профілометрія широко застосовується в метрології, промисловості і наукових дослідженнях.

Інтерференційні методи дають можливість вимірювати рельєф «технічних» поверхонь з роздільною здатністю менше 0,2 мкм, похибкою менше 0,1 мкм і високою продуктивністю (більше 100 точок вимірювання в секунду).

Широке застосування нанотехнологій і наноматеріалів в світовому та вітчизняному промисловому виробництві, постійно зростаючі вимоги до контролю якості промислових виробів машинобудування, електроніки і точної механіки роблять оптичну низько когерентну інтерферометрію одним із найбільш перспективних напрямків сучасного приладобудування.

У зв'язку із розвитком оптико-електронної бази, комп'ютерів та програмного забезпечення апаратура і методи низько когерентної інтерферометрії постійно вдосконалюються. На даний час багато зарубіжних фірм (Zeiss, Zygo, Veeco) пропонують широкий спектр мікроскопів-профі-

лометрів на основі низько когерентної інтерферометрії. Але вони призначені, в більшості, для роботи в лабораторних умовах. Висока вартість інтерферометричних профілометрів обмежує їх доступність для наукових досліджень і практичного застосування (рис. 5).

Наступним інтерферометричним методом вимірювання поверхні, який також застосовується в мікрообластях, є інтерферометрія спеклів. Спекли виникають через явища інтерференції на оптично шорстких поверхнях, які рефлектують світло дифузно. При шорсткій поверхні, яка освітлюється лазерним променем, цей ефект виражається тим, що розподіл інтенсивності усередині відблиску є негомогенним [16–18].

Системи для визначення топографії поверхні за допомогою структурованого світла найчастіше використовуються для визначення відстаней безпосередньо до поверхні об'єкта зі складним профілем і відзначаються простотою реалізації, потенційно високою точністю (похибки порядку декількох мікрометрів) та швидкодією (до 1000 і більше вимірювань в секунду). Суть проєкційного методу полягає в освітленні поверхні досліджуваного зразка вузьким зондуючим пучком;



Рис. 5. Безконтактний інтерференційний тривимірний профілометр «Мікрон-альфа»



Рис 6. Сканирующий конфокальный микроскоп LSM 710

формуванні в розсіяному світлі зображення точки оптичною системою, розміщеною під кутом до пучка зондування, реєстрації цього зображення та розрахунку поверхні.

Конфокальна лазерна скануюча мікроскопія (CLSM або LSM) – це один із методів світлової мікроскопії, який забезпечує опис детермінованих і недетермінованих структур поверхні. Із врахуванням високої швидкодії і великих об'ємів даних найбільш життєздатне рішення забезпечують оптичні вимірювальні системи. Однак при їх використанні приходиться стикатись з такими явищами, як круті зкоси, перемінні відображення, які при обробці та вимірюванні поверхонь можуть створити хибні зображення (рис. 6).

Латеральна роздільна здатність LSM обмежується доступною роздільною здатністю світлової мікроскопії і роздільною здатністю скануючого лазера. На відміну від інтерферометричного зображення цей метод забезпечує надійні дані вимірювань технічних поверхонь, які можна співставити із результатами використання найбільш точних контактних приладів [19].

Основними перевагами конфокальної мікроскопії у порівнянні із звичайною світловою мікроскопією є: висока контрастність зображення; отримання «оптичних зрізів» та на їх основі 3D-реконструкція; мультиспектральні дослідження із високим ступенем розподілу сигналів; можливість застосовувати методи цифрової обробки зображень. Недоліками LSM-вимірювань слід вважати складність налаштування та високу вартість обладнання та його експлуатації.

Метод РЕМ. Растровий електронний мікроскоп застосовують для роботи зі збільшенням від 50 до 100 тис. крат, при цьому глибина різкості в 300–500 разів більша, ніж у світлових мікроскопів (рис. 7). Зразок може бути нахилений до 45° відносно горизонтальної площини із утриманням

фокуса по всій поверхні. Завдяки великій глибині фокуса РЕМ створює «об'ємність» зображення і суттєво полегшує кількісну 3D-інтерпретацію мікротопографії зламів. На таких мікроскопах проводиться пряме дослідження поверхні зламу без приготування спеціальних реплік чи тонких фольг, як це потрібно в просвічуючій електронній мікроскопії. За допомогою РЕМ можна отримати 3D-картину зламу, здійснювати сучасні фрактографічні дослідження не тільки для аналізу причин руйнування матеріалів, але і для контролю якості виробів, а також як засіб для вивчення експлуатаційних властивостей металів та управління ними [20, 21].

Метод растрової електронної мікроскопії дає можливість вивчати мікротопографію (фрактографію) поверхонь зразків руйнування (зламів) після випробувань і здійснивши класифікацію ви-



Рис. 7. Растровий електронний мікроскоп JSM-7401



дів руйнування по типу зламу можна стверджувати про енергоємності процесів руйнування.

РЕМ дає можливість вивчати поверхню металоконструкцій з метою виявлення мікротріщин, здійснювати кількісну оцінку шорсткості металу; вивчати кінетику росту тріщини в зразку та встановлювати місця зародження магістральних тріщин, напрям та швидкість їх поширення; вивчати вплив фазових включень на механізми руйнування; досліджувати зв'язок мікротопографії зламів з вихідною структурою, вивчати морфологію фазових складових та їх об'ємну конфігурацію на поверхні протравлених мікрошліфів та зламів.

Перспективи розвитку фрактографії, топології та аналізу зображень. Висока роздільна здатність та особливо велика глибина фокуса, простота підготовки об'єктів досліджень, широкі можливості елементного аналізу при використанні різних систем реєстрації рентгенівського випромінювання дозволяють успішно використовувати метод мікро- та макрофрактографічного аналізу у матеріалознавчих дослідженнях для вивчення структури та елементного складу поверхонь зношування, тертя, руйнування, корозії, хімічної взаємодії, включень і т. д.

Оптичні методи аналізу зображень дозволяють одержувати тривимірну оцінку довільних поверхонь і, отже, значно розширює можливості фрактографічних досліджень.

Проте для комплексного вивчення поверхні матеріалів за електронним зображенням необхідно розробляти різноманітні методики розрахунку комплексних характеристик, які б визначали найбільш загальні властивості поверхні, що характеризують її стан, і величину мікропараметрів, що можливо при наявності відповідних алгоритмів і програмного забезпечення, а також при проведенні сертифікації поверхонь у мікро- та нанометровому діапазоні відповідно до норм і вимог міжнародних стандартів.

Висновки

Методами оптичної електронної мікроскопії успішно вирішуються задачі фізичного матеріалознавства, для яких кількісний аналіз зображень тонкої структури чи рельєфу поверхні із застосуванням вимірів є найбільш доцільним, а в ряді випадків і є домінуючим. Електронно-мікроскопічні дослідження уможливають аналіз об'ємної картини рельєфу поверхні матеріалів різноманітного призначення.

Сучасні методи фрактографії, топології та аналізу зображень характеризуються високою точністю, достовірністю та доступністю для широкого кола спеціалістів в одержанні кількісної інформації при металографічному досліджуванні [22–25].

Цифрова обробка зображень дозволяє суттєво збільшити можливості проведення мікроскопічних досліджень. Поєднання методів фотограмметрії та топології є перспективним у сьогоденні.

1. Новый метод трехмерной реконструкции нано- и микро-рельефа по сериям разнофокусных РЭМ-стереозображений / В. Н. Соколов, О. В. Разгулина, Д. И. Юрковец, М. С. Чернов // Материалы XXIII рос. конф. по РЭМ. Тезисы докладов. – Черногловка, 2010. – С. 78.
2. Determination of the fracture toughness with automatic image processing / J. Stampfl, S. Scherer, M. Gruber, O. Kolednik // Int. J. Frac. – 1996. – P. 139.
3. The IASTED International Conference on signal and image processing / G. N. Vishnyakov, G. G. Levin, K. E. Loshchilov, K. A. Sukhrukov // Fouriersynthtsis profilometry. – 2005. – С. 103–105.
4. Дюков В. Г., Кудеяров Ю. А. Растровая оптическая микроскопия. – М.: Наука, 1992. – 207 с.
5. Степаненко В. А. Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов // Пробл. прочности. – 1979. – № 12. – С. 89–91.
6. Кожан В. П., Корній В. В., Русин Б. П. Реконструкція форми поверхні матеріалів за їх зображеннями // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». «Автоматика, вимірювання та керування». – 2005. – № 530. – С. 116–120.
7. Zheltov S. Yu., Knyaz V. A., Stepanyants D. G. Automated photogrammetric system for photorealistic skull 3'D reconstruction: Videometrics and Optical Methods for 3'D Shape Measurements // Proceeding of SPIE. – 2001. – 4309. – P. 336–345.
8. Степаненко В. А. Метод та практичне застосування стереоскопічної фрактографії // Металознавство та обробка металів. – 1995. – № 1 – С.51–54.
9. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. – London: Academic Press., 1992. – P. 329.
10. Дорожинський О. Л., Тукай Р. Фотограмметрія. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 330 с.
11. Рудзит Я. А., Кризберг Ю. А. Шероховатость поверхностей // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Зинате, 1983. – С. 55.
12. Simov S., Simova S. Electron microscope study of surface topography by geometrical determination of metric characteristics of surface elements // J. of Microscopy. – 1985. – 137. – Pt. 1. – P. 47–55.
13. Дуда Р., Харп П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976. – 511 с.
14. Robinson G. M., Perry D. M., Peterson R. W. Optical interferometry of surfaces // Sci. Am. – 1991. – 265. – P. 67-71.
15. Whitehouse D. Handbook of Surface Metrology. – Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994. – 988 p.
16. Zolochevkaja O. V., Gnalovskij C. O. A holographic interferometer on the basis of multimode light guiding bundles // Proceedings SPIE. – 1995. – P. 694–697.
17. Maune M. Photogrammetric Self-Calibration of Scanning Electron Microscopes // Photogrammetric Eng. and Remote Sensing. – 1976. – 42, № 9. – P. 1161–1172.
18. Ковалев А. А., Сухоруков К. А. Восстановление формы волнового фронта при больших изменениях фазы // Измерит. техника. – 2004. – № 4 – С. 17–19.
19. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Степанов А. А. Новые методы обработки изображений // НЗНТ. Сер.: Авиационные системы. – 1992. – № 4. – С. 21.
20. Мельник В. Н., Соколов В. Н. Некоторые вопросы стереофрактографической обработки РЭМ-снимков // Изв. РАН. Сер. физ. – 1992. – С. 122–126.
21. Голубев В. Исследование телевизионных методов обработки изображений в растровой электронной микроскопии: Автореф. дис. ... канд.техн.наук. – М.: Машиностроение, 1980. – 20 с.
22. Пуятин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.



23. Л. Крейг. Практическая обработка изображений на языке Си. – М.: Мир, 1996. – 416 с.
24. Analysis of film coating thickness and surface area of pharmaceutical pellets using fluorescence microscopy and image analysis / M. Andersson, B. Holmquist, J. Lindquist et al. // J. Pharm. Biomed. – 2000. – 22 – P. 325–339.
25. Стась О. М., Гаврилюк В. П. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі // Методи дослідження та контролю якості металів. – 2000. – № 1-2. – С. 48–52.

The paper presents a comprehensive analysis of modern optical investigation methods of material micro- and macrosurfaces. Possibilities and evaluation of modern software for computer investigation methods at metallographic image processing are shown. High resolution and particularly great focal depth, simplicity of preparation of the objects of investigation, broad capabilities of elemental analysis at application of different systems for recording X-ray radiation allow a successful application of the methods of micro- and macrographic analysis in materials science investigations to study the structure and elemental composition of the surfaces of wear, friction, fracture, corrosion, chemical interaction and inclusions. Digital processing of images allows an essential enhancement of the capabilities of conducting microscopic studies.

Keywords : fractography, surface topology, electronic microscopy, metallographic images, microstructure

Надійшла до редакції
20.03.2014

КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ и ВЫСТАВОК по НК в 2014 г.

Наименование	Дата и место проведения	Контакты
Неразрушающий контроль аэрокосмических материалов и конструкций	12.05–14.05 Сент-Луис/США	www.asnt.org
8-я Международная конференция «Сварочные материалы»	16.06–18.06 Киев/Украина ИЭС им. Е. О. Патона	www.patonpublishinghouse.com
11-я Международная конференция по неразрушающему контролю и микроанализу для диагностики и сохранения культурного и экологического наследия – Искусство 2014	11.06–13.06 Мадрид/Испания	www.art2014.net
21-й Международный симпозиум румынской ассоциации неразрушающего контроля	11.06–13.06 Мамайя/Румыния	www.aroend.ro
5-я Международная конференция КАНДУ по техническому контролю в процессе эксплуатации и неразрушающему контролю в Канаде – 2014	20.06–23.06 Торонто/Канада	www.events.cinde.ca
Неразрушающий контроль на Дальнем Востоке – 2014	20.06–23.06 Ченгу/Китай	www.fenndti.com
53-я Ежегодная британская конференция по неразрушающему контролю – НК 2014	09.09–11.09 Манчестер/Англия	www.bindt.org
11-я Европейская конференция по неразрушающему контролю	06.10–10.10 Прага/Чехия	www.ecndt2014.com

ОБСЛЕДОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСА ВЫТЯЖНОЙ ТРУБЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В. А. ТРОИЦКИЙ, М. В. БОРОДАВКО, В. П. ДЯДИН, Е. А. ДАВЫДОВ, М. Н. КАРМАНОВ*
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проанализированы результаты проведенного неразрушающего контроля новой вытяжной трубы Чернобыльской АЭС. Рассмотрены особенности, которые необходимо учитывать при анализе технической документации и последующем проведении неразрушающего контроля трубчатых профилей, из которых изготовлена данная конструкция. Выполнена систематизация обнаруженных дефектов и рассмотрен характер их развития в сварных соединениях элементов фасонных деталей башни трубы. Проведен детальный анализ возможных причин появления таких трещин. Рассмотрены основные недостатки, которые были допущены при проектировании данной конструкции. Отмечено, что требования нормативного документа ДБН В.1.2-2:2006 для оценки возможных ветровых воздействий, вызывающих аэродинамические знакопеременные колебания трубчатых элементов, были учтены не в полном объеме. Это привело к возникновению усталостных повреждений сварных соединений. Даны рекомендации к проведению неразрушающего контроля крупногабаритных трубчатых конструкций. Библиогр. 2, табл. 2, рис. 11.

Ключевые слова: трубчатый каркас, вентиляционная вытяжная труба, Чернобыльская АЭС, неразрушающий контроль, прорезная фасонка, дефекты сварных швов, колебания раскосов, ветровая нагрузка, узловые соединения

В настоящее время при сооружении крупногабаритных конструкций все больше находят применение трубчатые профили различного сечения, позволяющие значительно снизить их металлоемкость. Из таких профилей строятся сейчас стадионы, мосты и другие сооружения. Вместе с тем как при дефектоскопии, так и при прочностных расчетах данных профилей необходимо учитывать их особенности [1]. Рассмотрим эти особенности на примере обследования уникального, общеевропейского значения объекта – башни новой вентиляционной трубы Чернобыльской АЭС. Башня изготовлена из трубчатых и мостовых элементов разного профиля. На рис. 1 показан общий вид и характер-

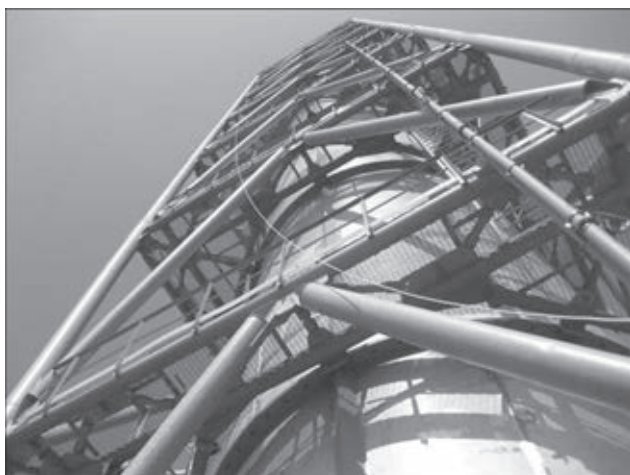


Рис. 1. Общий вид и характерные узлы каркаса вытяжной трубы

ные узлы этого уникального сооружения. Вентиляционная труба диаметром 6 м «одета» в поддерживающий каркас из деталей трубчатого профиля.

Данная вентиляционная труба заменила старую и обеспечивает вытяжку воздуха из третьего и четвертого (разрушенного) блоков ЧАЭС. Новая вентиляционная труба (НВТ) была введена в эксплуатацию в декабре 2011 г. С начала эксплуатации по июнь 2012 г. зрителями были обнаружены дефекты в сварных соединениях на элементах фасонных деталей башни трубы. Эксплуатационниками было выявлено всего 14 дефектов в узлах, соединяющих опорную стойку $\varnothing 325 \times 8$ мм и прорезную фасонку толщиной 12 мм на отметках +100; +107 и +114. Обнаруженные дефекты располагались в верхней части прорезных фасонки на границе перехода от сварного соединения к основному металлу фасонки с двух сторон. Зарождение дефектов и их развитие начиналось по верхнему краю фасонки от границы перехода с кольцевым швом, соединяющим прорезную фасонку с опорной стойкой. Типичные трещины приведены на рис. 2. Анализ возможных причин появления таких трещин показал, что при проектировании данной конструкции неудачно избыточно введен монтажный кольцевой шов трубы диаметром 325×8 мм по краю прорезной фасонки, который привел к повышенной концентрации напряжений. Как следствие, данный узел характеризуется крайне низким сопротивлением усталости; склонностью к появлению дефектов, создающих

*В работах принимал участие А. Е. Литвиненко



Рис. 2. Узел примыкания раскосов к опорной стойке $\varnothing 325 \times 8$ мм в узле 36-Ж на отметке 114,92 м с обнаруженным ранее дефектом (показано стрелкой)

дополнительные очаги для зарождения усталостных трещин. Этот недостаток проявился при циклических нагрузках, в данном случае вызываемых аэродинамическими эффектами.

Следует отметить, что, к сожалению, согласно нормативному документу ДБН В.1.2-2:2006 ветровые воздействия, вызывающие аэродинамические знакопеременные колебания, следует учитывать необязательно, только в необходимых случаях. При этом критерий и требования необходимости такого учета не приведены, хотя именно они имеют первостепенное значение для образования трещин.

Если предположить, что в прилегающих раскосах могут возникать аэродинамические знакопеременные колебания, то можно утверждать о большой вероятности быстрого возникновения и развития дефектов в этих узлах. Это, в свою очередь, значительно нивелирует преимущества применения трубчатых элементов в подобных конструкциях и требует специальных мер по определению появления трещин.

Перед началом дефектоскопических исследований был проведен анализ исполнительной документации монтажной организации. Он не выявил существенных отклонений от нормативных требований, которые могли бы привести к появлению и росту дефектов за такой короткий период времени эксплуатации. Сборка трубчатых элементов с прорезными фасонками проводилась в цеховых условиях, тем не менее, все обнаруженные трещины сконцентрированы в прорезных фасонках толщиной 12 мм, расположенных на отметках +100; +107 и +114. Этот факт косвенно опровергает предположение о причине появления трещин как водородного растрескивания, так как иначе следовало бы ожидать появления трещин во всех прорезных фасонках. Физико-химический анализ разломов также не подтвердил версию водородного растрескивания.

Сборка секций и раскосов выполнялась на промышленной площадке ЧАЭС, при этом отсут-

ствуют документальные свидетельства о том, что нагрузки при сборке и монтаже металлоконструкций во время проведения строительных работ превышали расчетные ограничения. Таким образом, исходя из анализа расположения обнаруженных дефектов ясно, что в основном трещины возникают по совокупности как конструктивных недоработок, так и возможных попутных допущенных технологических нарушений при изготовлении и монтаже узлов трубчатых соединений.

Для мониторинга состояния каркаса башни, исходя из предварительного анализа представленных данных, были поставлены следующие задачи выявления вероятных причин возникновения в трубчатой конструкции дефектов:

- влияние конструктивных решений, принятых при проектировании узла примыкания прорезной фасонки к опорной стойке и раскосу на появление и развитие трещин;
- количественная оценка дефектов, построение картины расположения зон с трещинами;
- уточнение характерных зон повреждений элементов каркаса и их взаимосвязь с различного рода нагрузками, включая учет местной розы ветров и т. п.

При проведении выборочного НК сварных соединений металлоконструкций были применены УЗД, капиллярный и магнитный методы. Для этого было отобрано 52 участка, расположенных в сварных соединениях опорной стойки $\varnothing 325 \times 8$ мм и прорезными фасонками толщиной 12 и 14 мм на отметках +78,92; +86,12; +93,32; +100,52; +107,72 и +114,92. Отобранные места включали все обнаруженные ранее дефекты (рис. 2); обозначения узлов представлены на рис. 3. Обследованию подвергались все элементы обвязки каркаса трубы.

В процессе визуального обследования всего трубчатого каркаса башни НВТ было выявлено, что обнаруженные трещины носят системный характер [2]. Они расположены на отметках +100,52; +107,72; +114,92 и +122 м и находятся как в узлах соединения элементов раскоса с опорными

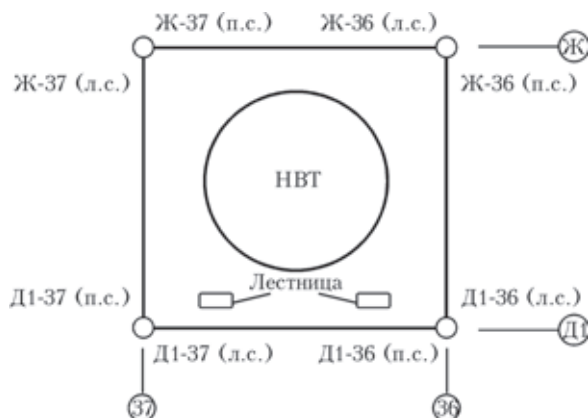


Рис. 3. Разработанная схема обозначения узлов для каждой отметки (п.с., л.с. – правая и левая сторона узла соответственно)

стойками башни (рис. 2, 4), так и в узлах соединения раскосов с распоркой в средней ее части под площадками, расположенными на данных отметках (рис. 5). Важно отметить, что при первичном осмотре повреждения были выявлены только в узлах крепления элементов решетки (раскосов и распорок) к трубчатым стойкам. Характерной особенностью выявленных дефектов в узлах соединения элементов раскоса с опорными стойками башни являлось то, что они находились в верхней части фасонки на границе перехода от углового сварного соединения к основному металлу фасонки и наблюдались с двух ее сторон. Из 17 трещин в узлах соединения элементов раскоса с опорными трубчатыми стойками только часть имела сквозной характер, развившихся от верхнего края прорезной фасонки. Такой рост трещин мог быть вызван изгибом, действующим из плоскости фасонки. Рост глубины трещин такого рода продолжится только в том случае, если будут превышены прежние нагрузки.

Данное предположение достаточно хорошо согласуется с тем фактом, что дополнительно выявленные трещины в узлах соединения раскосов с распоркой (рис. 5) как раз попадают под действие такого изгиба. Узел характерен тем, что врезная фасонка раскоса с одной стороны подкреплена ребром жесткости, которое приварено к фасонке и заглушке. Такое соединение является неудачным и является наиболее уязвимым к появлению и разви-

тию трещин при действии изгибающих усилий из-за наличия резкого перепада жесткостей (рис. 5). Значительная разница в размерах трещин может означать, что они образовались в разное время, находятся в зонах разных нагрузок и все они развиваются как трещины усталости. Отсутствие видимого раскрытия берегов трещины, несмотря на их протяженность, дополнительно свидетельствует об усталостном характере их происхождения.

Так, при обследовании узлов, соединяющих опорную трубную стойку $\varnothing 325 \times 8$ мм и прорезную фасонку толщиной 12 мм на отметке +100, 52,



Рис. 4. Характерное повреждение по границе перехода от шва к основному металлу прорезной фасонки



Рис. 5. Характерное повреждение в узле соединения раскосов с распоркой под площадкой (показаны стрелками)



Рис. 6. Трещина в заглушке в зоне ребра левого (а) и правого (б) раскоса длиной около 150 мм по линии (37-Д1)-(37-Ж) ниже отметки +107,72 и общий вид расположения раскосов под площадкой ниже отметки +107,72 в зоне крепления к горизонтальной связи по линии (37-Д1)-(37-Ж) (в)



было выявлено шесть трещин, развивающихся по околошовной зоне угловых швов со стороны прорезных фасонки, протяженностью от 50 до 150 мм. Характерно, что в узле расколов под площадкой был выявлен только один дефект в ребре протяженностью около 25 мм на высоте, где помимо уменьшения толщины фасонки уменьшается и диаметр труб, используемых для вертикальных связей и расколов.

Визуальный осмотр на уровне площадки +107,72 (рис. 6 – 8) показал, что узлы соединения расколов под площадкой претерпели значительные повреждения за истекший период после монтажа. Основные повреждения расколов носят систематический характер и находятся в зоне приварки заглушки и ребра жесткости к ней.

Всего на данной отметке было обнаружено 9 трещин. Трещины также носят систематический характер развития и находятся в узлах крепления расколов к горизонтальной связи под площадкой (4) и соединениях с опорной стойкой (5 трещин).

Обследование узлов, соединяющих опорную трубчатую стойку $\varnothing 325 \times 8$ мм и прорезную фасонку толщиной 12 мм на отметке +114,92 также

показало наличие трещин, развивающихся по околошовной зоне угловых швов со стороны прорезных фасонки и повреждения расколов в местах их крепления к горизонтальным связям под площадкой.

Всего на данной отметке было обнаружено 14 трещин: узел крепления раскола к горизонтальной связи под площадкой (6) и узел соединения опорных стоек в местах контакта с прорезной фасонкой (7+1).

Кроме того, по нашей просьбе заказчик предоставил фрагмент ранее вырезанного участка для визуального осмотра. Имеющийся на поверхности вырезанного фрагмента излом представлен на рис. 9. На рисунке хорошо видно, что поверхность излома носит ступенчатый характер. Шевронный узор на поверхности излома дополнительно свидетельствует об усталостном характере развития трещины с внешней стороны фасонки по околошовной зоне углового шва. Причем ступенчатый характер развития трещины имеет место с обеих сторон фасонки, что свидетельствует о знакопеременной нагрузке.

Стоит выделить результаты осмотра узлов на отметке +122,12, где были выявлены только повреждения расколов в местах их крепления к го-

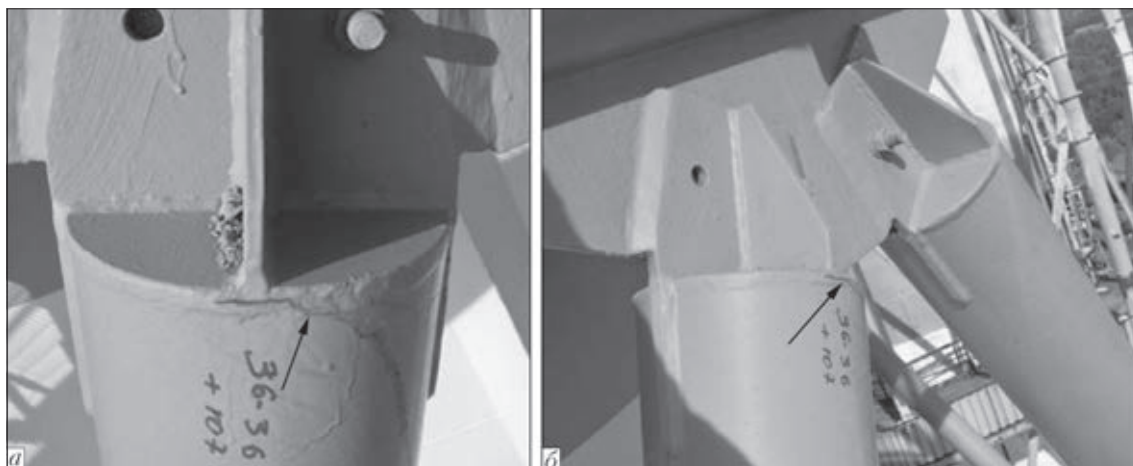


Рис. 7. Трещина в заглушке под ребром левого раскола длиной около 60 мм по линии (36-Д1) – (36-Ж) ниже отметки +107,72 (а) и общий вид расположения расколов под площадкой с отметкой +107,72 в зоне крепления к горизонтальной связи по линии (36-Д1) – (36-Ж) (б)

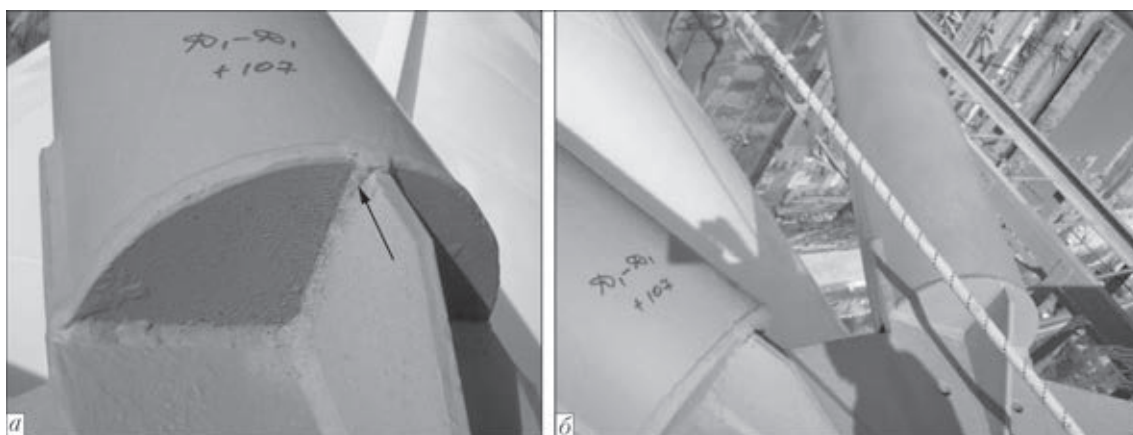


Рис. 8. Трещина в ребре левого раскола длиной около 25 мм по линии (36-Д1) – (37-Д1) ниже отметки +107,72 (а) и общий вид расположения расколов под площадкой с отметкой +107,72 в зоне крепления к горизонтальной связи по линии (36-Д1) – (37-Д1) (б)

ризонтальным связям под площадкой. Всего на данной отметке было обнаружено 6 трещин.

В табл. 1. представлены сводные данные обнаруженных дефектов в раскосах, расположенных ниже отметок +107; +114 и +122.

Результаты ультразвукового контроля основных элементов каркаса систематизированы в табл. 2 (обозначение узлов показано на рис. 3).

Кроме зон, отмеченных в табл. 2, был выполнен также УЗ-контроль основного металла прорезных фасонок. Контролю подвергались участки, примыкающие к сварному соединению фасонки со стороны опорной стойки, на участках шириной примерно 50...60 мм, а также участки под сварным соединением приварки раскоса к фасонке. Целью проведения данного обследования являлось выявление потенциальных мест расслоения основного металла из-за сварочных напряжений в направлении толщины фасонки (Z-направление).

В результате проведенного контроля основного металла фасонки на отобранных контрольных участках расслоения не выявлены, что свидетельствует о том, что металл для изготовления каркаса НВТ был достаточно хорошего качества.

На рис. 10 представлен общий вид расположения обнаруженных трещин. Места повреждений

выделены красным цветом. Как видно из данного рисунка, дефекты в конструкции распределяются достаточно равномерно, включая отметку 122 м.

Для выявления роли розы ветров в зоне сооружения, т. е. распределения дефектов в узловых со-

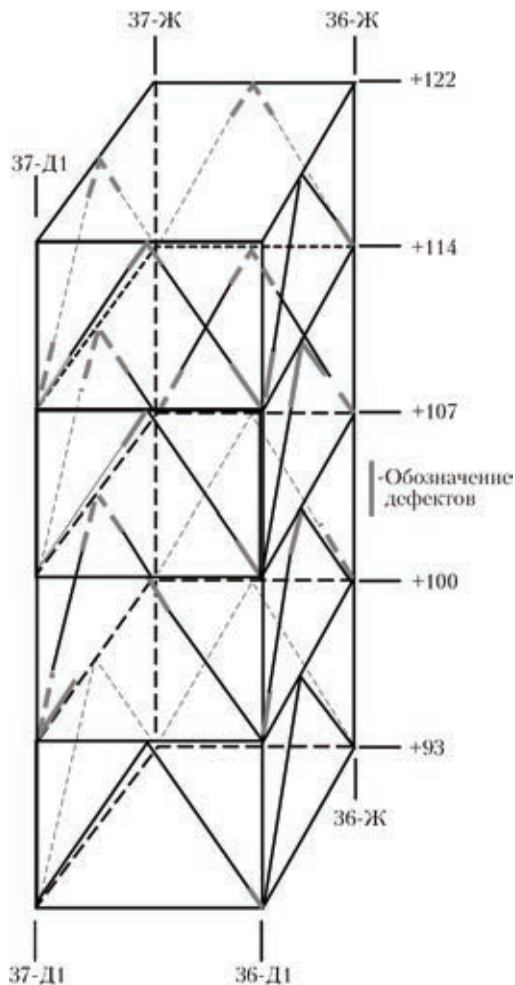


Рис. 10. Общий вид верхней части каркаса трубчатой конструкции НВТ и мест расположения трещин на верхних элементах каркаса

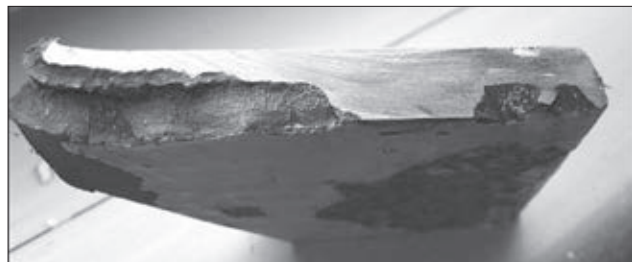


Рис. 9. Поверхности излома фрагмента левой фасонки узла 36-Ж на отметке 114,92

Таблица 1. Выявленные дефекты в узлах соединения раскосов под площадками по результатам визуального контроля

Номер п/п	Обозначение площадки	Обозначение узла	Выявленный размер трещин, мм
1	Узлы соединения раскосов под площадкой +122 м	Ж37-Д1-37 правый (запад)	Трещина в заглушке под ребром 50 мм, в ребре 5 мм
2		Ж37-Д1-37 левый (запад)	Трещина в ребре 80 мм
3		Ж37-Ж36 правый (север)	Трещина в заглушке 180 мм
4		Ж37-Ж36 левый (север)	Трещина в ребре 35 мм
5		Д1 37-Д1 36 правый (юг)	Подрыв ребра жесткости 50 мм
6		Д1 37-Д1 36 левый (юг)	Подрыв ребра жесткости 25 мм
7	Узлы соединения раскосов под площадкой +114 м	Ж36-Д1 36 правый (восток)	Трещина в заглушке в зоне приварки ребра 80 мм
8		Ж36-Д1 36 правый (восток)	Трещина в ребре 5 мм
9		Ж37-Д1-37 правый (запад)	Подрыв заглушки в зоне ребра 100 мм
10		Ж37-Д1-37 левый (запад)	Трещина в ребре 10 мм
11		Ж37-Ж36 правый (север)	Трещина в ребре 30 мм и подрыв заглушки 100 мм
12		Ж37-Ж36 левый (север)	Трещина в ребре 30 мм
13	Узлы соединения раскосов под площадкой +107 м	Д1 37-Д1 36 правый (юг)	В правом раскосе подорвано ребро жесткости 35 мм; в левом 5 мм
14		Ж36-Д1 36 левый (восток)	Подрыв заглушки 60 мм. В ребре нет выкружки
15		Ж37-Д1-37 правый (запад)	Трещина в заглушке 150 мм
16		Ж37-Д1-37 левый (запад)	Трещина в заглушке 150 мм
17		Д1 37-Д1 36 левый (юг)	Трещина в заглушке 25 мм



Таблица 2. Результаты УЗК сварных соединений фасонка–труба

Номер п/п	Обозначение отметки	Обозначение узла (см. рис. 3)	Выявленная длина L несплошности, мм	Примечания
1	+78,92	Ж-36 (л.с.)	20	Поверхностный подрез. Начинается с 60 мм, протяженность 20 мм
2	+93,32	Д1-36 (п.с.)	Не выявлено	
3	+100,52	Д1-37 (п.с.)	50	От начала фасонки
4		Д1-37 (л.с.)	50	От начала фасонки. Визуально ранее не выявлена
5		Ж-37 (п.с.)	Не выявлено	
6		Ж-37 (л.с.)	60	От начала фасонки
7		Ж-36 (п.с.)	50	->-
8		Ж-36 (л.с.)	50	->-
9		Д1-36 (п.с.)	Не выявлено	
10		Д1-36 (л.с.)	120	От начала фасонки
11	+107,72	Д1-37 (п.с.)	Не выявлено	
12		Д1-37 (л.с.)	->-	Возможно несплавление по кромке около 30 мм (от начала фасонки)
13		Ж-37 (п.с.)	->-	
14		Ж-37 (л.с.)	80	От начала фасонки
15		Ж-36 (п.с.)	50	->-
16		Ж-36 (л.с.)	Не выявлено	
17		Д1-36 (п.с.)	40	От начала фасонки
18		Д1-36 (л.с.)	Не выявлено	
19	+114,92	Д1-37 (п.с.)	30	От начала фасонки
20		Д1-37 (л.с.)	60	->-
21		Ж-37 (п.с.)	40	От начала фасонки. Визуально ранее не выявлена
22		Ж-37 (л.с.)	Не выявлено	
23		Ж-36 (п.с.)	40	От начала фасонки. Визуально ранее не выявлена
24		Ж-36 (л.с.)	-	Удалена часть фасонки
25		Д1-36 (п.с.)	100	От начала фасонки
26		Д1-36 (л.с.)	100	->-

Примечание: л.с. – левая сторона узла, п.с. – правая сторона

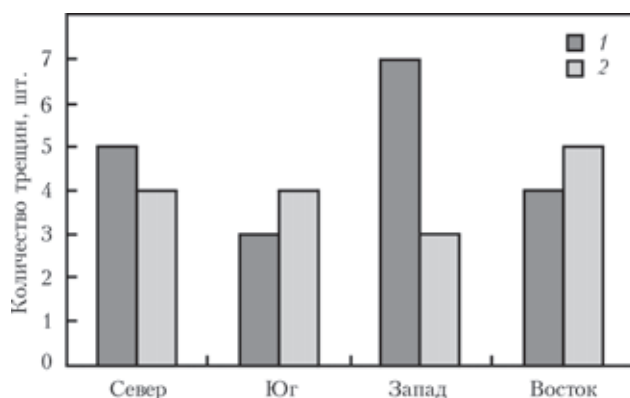


Рис. 11. Распределение выявленных трещин в зависимости от сторон света: 1 – трещины в прорезных фасонках; 2 – трещины в раскосах над площадками (трубными загрузками)

единениях каркаса НВТ и направления ветровых нагрузок, на рис. 11 дана гистограмма ветров по их направлениям.

Как видно из рис. 11, минимальное значение обнаруженных дефектов наблюдается при ветрах южного направления, а наибольшее – при западном направлении ветров и соответствует розе ветров в месте сооружения, что рекомендовано учесть при выполнении ремонтных работ и реконструкции каркаса.

Выводы

Трубная металлоконструкция каркаса новой вытяжной трубы Чернобыльской АЭС была подвергнута с помощью средств неразрушающего контроля тщательному обследованию и было обнаружено много опасных трещин.

Геометрические размеры узлов 36-Д1, 36-Ж, 37-Д1 и 37-Ж на всех отметках каркаса НВТ соответствуют представленной проектной и исполнительной документации, минимальные толщины угловых швов соответствуют требованиям таблицы 38 СНиП II-23-81. В целом конструкция изготовлена и смонтирована в соответствии с требованиями проекта.

Выявленные дефекты расположены преимущественно на отметках +100; +107; +114 и 122 и носят систематический характер, т. е. являются недостатками проектирования.

Все трещины в раскосах наблюдаются только в трубчатых элементах $\varnothing 180 \times 6$. На больших диаметрах и толщинах трещин не наблюдается, что должно быть учтено при сооружении подобных трубчатых конструкций.

Все трещины в прорезных фасонках наблюдаются при их переходе на толщину 12 мм и в зонах сварных соединений стыковки вертикальных

трубчатых стоек, т.е. зоны повышенной концентрации остаточных напряжений.

Анализ поверхности излома на левой фасонке узла 36-Ж (отметка +114,92) свидетельствует об усталостном характере развития двухстороннего излома со стороны прорезной плоской фасонки по околошовной зоне ее приварки к трубчатой опорной стойке.

Трещины в раскосах расположены в околошовных зонах приварки заглушек к трубе в местах пересечения с вертикальным ребром жесткости и носят усталостный характер развития, чего так же могло бы не быть при правильном проектировании.

Наибольшая поврежденность верхних элементов башни НВТ наблюдается со стороны запад-

ного направления ветра, т.е. при сооружении подобных объектов должна учитываться роза ветров местности на разных высотах.

Результаты проведенных дефектоскопических исследований и выполненный анализ происхождения трещин должны быть учтены при реконструкции данного ответственного сооружения.

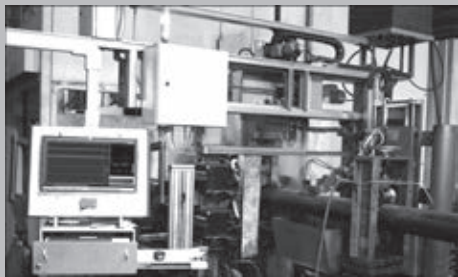
1. *Определение* причин возникновения трещин в конструктивных элементах башни новой вентиляционной трубы на Чернобыльской АЭС / В. М. Тороп., Э. Ф. Гарф., А. В. Якимкин., Е. Е. Гопкало // Автомат. сварка – 2014. – № 1. – С. 5–16.
2. *Результаты* обследования сварных соединений каркаса новой вентиляционной трубы на объекте «Чернобыльская АЭС»: отчет Опыт. конструктор.-технолог. бюро ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. – Киев, 2012. – 83 с.

Results of the performed nondestructive testing of the new exhaust pipe of Chernobyl NPP have been analyzed. Features are considered, which should be taken into account at analysis of technical documentation and subsequent performance of NDT of tubular sections, from which this structure is made. Systematizing of the detected defects was performed and nature of their development in welded joints of shaped elements of pipe tower was considered. Detailed analysis of the possible causes for appearance of such cracks was performed. Main drawbacks of this structure design are considered. It is noted that requirements of normative document DBN V.1.2-2:2006 to assess the possible wind impacts causing aerodynamic alternating vibrations in tubular elements, have not been fully taken into account. 2 References, 2 Tables, 11 Figures.

Key words: tubular frame, ventilation pipe, Chernobyl NPP, non-destructive testing, slotted gusset, weld defects, brace vibrations, wind load, nodal connections

Поступила в редакцию
01.04.2014

ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ПРЯМОШОВНЫХ ТРУБ



На базе Украинского научно-исследовательского института неразрушающего контроля (УкрНИИ НК) была разработана комплексная система неразрушающего ультразвукового контроля сварного шва «ПШ-11».

Система состоит из модуля ультразвукового контроля наличия продольно-ориентированных дефектов в линии сплавления и околошовной зоне и модуля «профилометрии», при помощи которого обеспечивается измерение толщины стенки основного металла трубы, высоты остаточного наружного и внутреннего

грата, а также оценка конфигурации зоны сварного шва и прилегающих зон тела трубы. Система эксплуатируется в тяжелых производственных условиях: высокие температуры – до 250 °С в зоне контроля, наличие большого количества окалины и высокая скорость контроля – до 1 м/с.

Опыт эксплуатации показал высокую эффективность оборудования в части выявления дефектов металла в прикромочной зоне листа, подлежащей сварке, онлайн мониторинга процесса механической обработки наружного и внутреннего гратов сварного шва.

Система технологического УЗК сварного шва «ПШ-11» благодаря мощному аппаратно-вычислительному комплексу «Унискан-ЛуЧ» и использованию новейших технологий в части автоматизации позволяют сохранять полный пакет информации о проведенном контроле: регистрация и учет пользователей системы с различными уровнями доступа, регистрация и сохранение базы данных настроек на различные типоразмеры и марки стали труб, базы проконтролированных труб с возможностью просмотра диаграмм по каждой трубе отдельно и формированием суммарных отчетов и протоколов. Система позволяет производить краскоотметку дефектных сечений на трубе с точностью не хуже 30 мм.



ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО ТЯГОВОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА

К. Ф. БОРЯК, С. Л. ВОЛКОВ, Е. С. ШПАТ

Одесская гос. акад. техн. регулирования и качества. 65020, г. Одесса, ул. Кузнечная, 15. E-mail: ndi_pssem@mail.ru

Приводятся результаты анализа существующих диагностических систем, которые внедрены на предприятиях железнодорожного транспорта. Отмечены недостатки систем. Обосновывается новая концепция создания системы мониторинга для диагностики технического состояния главных механических узлов железнодорожного транспорта. Показано, что в концепции главным параметром для определения момента наступления предельного состояния является числовое значение температуры или градиента скорости нагрева объекта. Библиогр. 7.

Ключевые слова: диагностика, система мониторинга, техническое состояние, деградационный процесс, техническое обслуживание

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами. На предприятиях по обслуживанию и ремонту железнодорожного транспорта уже давно применяются вибродиагностические комплексы, где в качестве определяющего параметра служит уровень вибрации, который нормируется по частоте, периоду, амплитуде колебаний и измеряется датчиками виброскорости или виброускорения [1]. Любой вибродиагностический комплекс базируется на свойстве механического объекта изменять свою собственную частоту колебаний в зависимости от степени износа конструктивных деталей вследствие развивающихся во времени деградационных процессов. По мере приближения значения собственной частоты объекта к значению рабочей частоты уровень вибрации увеличивается, а при их совпадении возникает явление резонанса. Задача вибрационного мониторинга — предупреждение возникновения резонансных явлений за счет проведения своевременного технического обслуживания (ТО), текущего (ТР) или капитального ремонтов (КР) с заменой конструктивных узлов.

Анализ исследований и публикаций. Известны примеры организации мониторинга за изменением деградационных процессов в отдельно взятых механических узлах, в основе которого лежат те же виброакустические измерения [2]. В этом направлении за последние два десятилетия создано множество измерительных комплексов, которые в той или иной мере успешно применяются [3]. Однако достоверность полученных числовых прогнозных оценок о скорости развития деграда-

ционных процессов в обследуемых механических узлах далеко не всегда подтверждается на практике, что порождает недоверие эксплуатирующего персонала к методу вибродиагностики и в итоге сдерживает ее широкое применение. Это связано с тем, что вибродиагностические комплексы требуют обязательного наличия на предприятиях обученного высококвалифицированного инженерно-технического персонала. Полученные в ходе мониторинга гармоники вибрации являются интегральными для всего объекта в целом, необходимо корректно выделить из них составляющие гармоники для каждого конструктивного узла в отдельности, чтобы можно было сопоставить измеренное значение вибрации конкретного узла с нормируемым для него критическим значением, соответствующим наступлению предельного состояния.

Изложенное выше свидетельствует о том, что эффективность вибродиагностики существенно зависит от человеческого фактора, что является ее главным недостатком и преградой к повсеместному и широкомасштабному внедрению. Следовательно, объектами исследования являются важные конструктивные и механические узлы подвижного тягового железнодорожного состава. При этом следует учитывать, что главной целью диагностирования является определение технического состояния главных механических узлов подвижного тягового железнодорожного транспорта на протяжении всего периода эксплуатации, используя статистические данные температурного мониторинга.

Таким образом, цель работы заключается в решении следующих задач: возможности на основании анализа полученных результатов измерений определения технического состояния или

работоспособности (уровень износа) механических узлов, а также получения прогнозных оценок (численные значения градиента) скорости изменения во времени развивающихся деградационных процессов в механических узлах. Это позволит рассчитать остаточный технический ресурс диагностируемых узлов, разработать методологию повышения технического ресурса конструктивных узлов в соответствии с имеющейся материально-технической базой и требованиями ведомственных нормативных документов и на основе мониторинга оптимизировать сроки и объемы проведения ТО, ТР и КР.

Новизна предложений для достижения поставленной цели. Мы предлагаем создать диагностический комплекс, в основе которого лежат термические исследования деградационных процессов. Большинство деградационных процессов, которые развиваются в механических узлах железнодорожного состава, являются термическими, т. е. изменение скорости деградации напрямую зависит от температуры. Следовательно, логично было бы организовать температурный мониторинг за эксплуатацией механических узлов железнодорожного транспорта. Более того, работающий на предприятиях персонал уже изначально имеет начальные знания о допустимых критических значениях температурного нагрева отдельных механических узлов железнодорожного транспорта и требуется только довооружить квалифицированный персонал соответствующими средствами измерения, обработки, хранения, передачи результатов на расстояние, удобного представления информации для визуализации, анализа и принятия решения, т. е. разработать соответствующую систему мониторинга.

Поскольку критическое значение температуры кипения воды, при которой она превращается в пар, равно 100 °С, то, следовательно, допустимая температура охлаждающей жидкости (воды) в системе охлаждения дизельного двигателя любого тепловоза должна быть меньше этого значения, например, в пределах 85...90 °С. Отсюда следует, что и для системы смазки дизельного двигателя эти пределы будут такими же. Следует сказать, что сама по себе фиксация момента перегрева масла и охлаждающей жидкости по установленным в кабине машиниста тепловоза измерительным приборам служит простым подтверждением уже случившегося факта о том, что системы смазки или охлаждения находятся в технически неисправном состоянии и требуется провести им ТО или ТР. По сути это фиксация момента наступления аварийной ситуации. Нам же больше интересуют возможности ее предупреждения и в этом сможет помочь налаженная система мониторинга. Для этого надо фиксировать во время эксплуата-

ции не только численные значения температуры нагрева смазки и охлаждающей жидкости, но и их производные по времени, т. е. градиенты скорости нарастания температуры за определенный промежуток времени.

Известно, если обе системы находятся в технически исправном состоянии, то скорость нагрева масла и охлаждающей жидкости (при условии неизменности их объема (исключение протечек), качестве (одинаковости химического состава) и начальной температуры (окружающей среды)) для одного и того же типа дизельного двигателя будет постоянной. Для каждого конкретного типа тепловоза исходные числовые критические значения градиента скорости, которые соответствуют наступлению предельного состояния нагрева масла и охлаждающей жидкости, можно получить из мониторинга. В тех случаях, когда мониторинг проводится непрерывно, спрогнозировать наступление момента аварийной ситуации будет очень легко. Для случая, когда мониторинг проводится выборочно (эпизодически) тоже можно спрогнозировать наступление аварийной ситуации, поскольку искомые значения градиента скорости нагрева можно легко получить в депо в период запуска двигателя и его прогрева на холостых оборотах до момента выхода тепловоза на линию. Логика очень проста и продиктована физикой процесса – если система смазки и охлаждения двигателя начинают засоряться или протекать (объем жидкости уменьшается), то при одних и тех же холостых оборотах двигателя при прогреве градиент скорости нагрева будет соответственно изменяться (уменьшаться). Проводя мониторинг за изменением градиента скорости нагрева, можно будет прогнозировать дату и время захода тепловоза на ТО или ТР по техническому состоянию, главное своевременно не пропустить момент наступления критических значений. Это только один из примеров практического использования рабочим персоналом информации, полученной при температурном мониторинге масла и охлаждающей жидкости во время эксплуатации тепловоза.

Для дизель-электрического подвижного тягового состава сферу мониторинга следует разбить на две составляющие: тяговый двигатель с приводом на колеса и ходовая тележечная часть. В первую часть под температурный мониторинг попадут следующие механические узлы:

– дизельный двигатель, в частности, система смазки и система водяного охлаждения. Сегодня на всех без исключения тепловозах есть измерительные приборы температуры масла в двигателе и температуры охлаждающей жидкости, однако записи показаний во времени и сама система мониторинга отсутствует. Сегодня эти приборы служат в качестве аварийных датчиков, т. е. на



случай перегрева машинист обязан заглушить мотор, в противном случае перегрев и внеплановый ремонт двигателя. Но ведь данную ситуацию можно предусмотреть, если бы был организован температурный мониторинг, например, хотя бы за радиаторными секциями охлаждения двигателя, на основе которого можно было бы своевременно выявить неисправные секции в системе охлаждения. Для этого надо поставить на каждую секцию температурный датчик-регистратор [4] и по заходу тепловоза в депо осмотрщик с помощью сканера за несколько минут снял бы показания со всех датчиков и определил техническое состояние (работоспособность) каждой радиаторной секции. Аналогичная ситуация с организацией температурного мониторинга за генератором, коробкой скоростей, редукторным приводом. Под температурный мониторинг также попадают все механические узлы тепловоза, в конструкции которых присутствует трение;

– в ходовой части следует организовать температурный мониторинг, например, за гидравлическими демпферами (неработающий демпфер меньше греется, чем исправный) [5], буксовыми узлами, тормозной системой, в частности, ободов колес, которые могут перегреваться от неравномерности распределения тормозного усилия по тормозным колодкам колеса и т. п.

Можно привести аналогичный пример использования информации температурного мониторинга в пассажирских вагонных депо. Согласно ведомственному нормативному документу [6], после сборки редуктора необходимо испытать на специальном обкаточном стенде сначала 1 ч без нагрузки, потом 2 ч под нагрузкой. При этом определяющим параметром оценки качества сборки редуктора является температура нагрева редуктора во время трехчасовых испытаний, которая за указанный промежуток времени в конце испытаний не должна превышать 70 °С. Однако опытные мастера редукторно-карданного цеха давно проводят урезанные по времени (до 25 мин вместо 3 ч) испытания на стендах редукторов от средней части оси колесной пары пассажирских вагонов. Зафиксировав критическое значение возрастания градиента температуры редуктора в течение первых 25 мин его испытаний под нагрузкой, они успешно используют эту информацию в целях экономии рабочего времени и электроэнергии (до 100 кВт/ч на одном испытании). В целях подтверждения (или опровержения) практикуемой мастерами методики ускоренных испытаний редукторов целесообразно провести научные экспериментальные исследования и узаконить «ноу-хау», внося соответствующие изменения в ведомственную нормативную документацию [6]. После экспериментальной проверки эту информа-

цию можно использовать на законных основаниях, проводя температурный мониторинг за редукторами в пути следования пассажирских вагонов.

Для пассажирских вагонов мониторингу следует подвергнуть такие важные конструктивные узлы:

– по кузову вагона: подкрышное пространство, пассажирский салон (купе вместе с основным коридором), тамбуры. На основании информации о температурных измерениях в подкрышном пространстве можно будет сделать вывод о техническом состоянии (тепловые потери) теплоизоляции [7] и герметизации (циркуляции воздуха) кузова вагона. По информации о температурных колебаниях в пассажирском салоне можно будет судить об уровне предоставляемого комфорта пассажирам в поездке железнодорожным транспортом, о качестве работы проводников, снизить поток жалоб от пассажиров на проводников за излишнюю «жару» или «холод» в вагоне, сэкономить на отоплении в холодное время года, проверить техническое состояние системы кондиционирования воздуха в жаркое время года;

– по ходовой тележечной части вагона: буксовые узлы, генератор, редуктор, блок кондиционера, гидравлические гасители колебаний. По данным мониторинга можно выявить проблемные узлы, выполнить в депо соответствующий вид ТО или ТР этим узлам в период отстоя состава и тем самым предотвратить возможность возникновения аварийной ситуации в пути следования. По указанным узлам можно будет перейти от «регламентного» технического обслуживания к обслуживанию по «техническому состоянию», если заработает система температурного мониторинга этих механических узлов. При этом значительно сократится общий объем трудоемких операций по демонтажу из-под вагона этих узлов.

В состав любого диагностического комплекса входят следующие элементы:

– средства измерительной техники (датчики-регистраторы) с заданными режимами работы: on-line или в режиме записи на flash-носитель;

– телекоммуникационные средства проводной или беспроводной связи для передачи данных результатов измерений на заданное расстояние;

– автоматизированные средства обработки полученной информации и представление информации в удобном формате для анализа;

– средства для архивации и ведение статистических наблюдений.

Прежде чем выбрать по указанным пунктам сложную электронную технику, надо конкретизировать числовые значения определяющих параметров, соответствующие моменту наступления предельного технического состояния, определиться с уровнем погрешности проводимых измерений, разработать методику расчета остаточного техни-

ческого ресурса и получения прогнозных оценок о развитии деградационных процессов для каждого из объектов диагностирования на основе получаемой статистической информации.

Выводы

В перспективе логическим продолжением станет усовершенствование методологии определения технического ресурса и моделей оптимизации процессов его восполнения для механических конструктивных узлов тягового подвижного состава. Ожидаемый результат от внедрения системы температурного мониторинга – снижение материальных затрат на эксплуатацию железнодорожного транспорта за счет перехода от «регламентного» технического обслуживания механических узлов к обслуживанию их «по техническому состоянию», повышение уровня безопасности движения за счет предотвращения аварийных ситуаций, повышение общего уровня комфорта пассажиров, путешествующих железнодорожным транспортом.

The paper gives the results of analysis of currently available diagnostic systems, which are introduced in railway transportation enterprises. System disadvantages are noted. A new concept of development of a monitoring system for diagnostics of technical condition of the main mechanical components of railway transportation is substantiated. It is shown that the numerical value of temperature or gradient of object heating rate is the main parameter to determine the moment of limit state ingress in this concept. Ref. 7.

Keywords : diagnostics, monitoring system, technical state, degradation process, maintenance

Поступила в редакцию
14.02.2014

НОВАЯ КНИГА

Во втором квартале 2014 г. выйдет в свет книга

Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, А. С. Миленин. Практические рекомендации Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по ремонту сваркой магистральных трубопроводов без вывода из эксплуатации. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. — 8 печ. л.

Издание посвящено вопросам оценки несущей способности магистральных газо- и нефтепроводов с обнаруженными характерными технологическими и эксплуатационными дефектами формы и несплошности материала, а также типичным методам ремонта сваркой без вывода из эксплуатации. В частности, обобщены основные аспекты актуальных отечественных и зарубежных нормативных документов, современные подходы механики разрушения и численного анализа напряженно-деформированного состояния сварных конструкций, новейшие разработки специалистов Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Сформулированы практические инженерные алгоритмы, позволяющие оценивать фактическую степень поврежденности участков магистральных трубопроводов на основе данных технической диагностики, планировать ремонт дефектных трубопроводных элементов без вывода их из эксплуатации с позиций эффективности и безопасности проведения работ, прогнозировать ресурс эксплуатации участков трубопровода после ремонта.

Для инженерного персонала организаций, эксплуатирующих магистральные трубопроводы, специалистов неразрушающего контроля и технической диагностики трубопроводных систем, научных работников, занимающихся вопросами прочности сварных конструкций и методами восстановления их несущей способности, и преподавательского состава высших учебных заведений соответствующего профиля.

Заказы на книгу направлять в редакцию журнала.



ПРАКТИКА РЕАЛИЗАЦИИ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ КОМПЛЕКСА «КОРУНД»

В. А. СИДОРОВ¹, А. Е. СУШКО², Е. М. ДЕМИН³

¹Донецкий нац. техн. ун-т. 83000, г. Донецк, ул. Артема, 58. E-mail: info@dgtu.donetsk.ua

²ООО «ДИАМЕХ 2000». 115432, г. Москва, 2-й Кожуховский проезд, 29. E-mail: diamech@diamech.ru

³ГП «ДИАМЕХ-Украина». 61105, г. Харьков, ул. Киргизская, 19АБК-1. E-mail: diamech@vlink.kharkov.ua

Рассмотрен пример реализации стационарной системы вибродиагностики «КОРУНД» для комбинированных редукторов и проводных двигателей среднесортного прокатного стана 390. Предлагаемое решение учитывает особенности диагностики прокатных станков и предполагает поэтапное внедрение и использование комплекса диагностических параметров для постановки диагноза. Основная задача – повышение долговечности и безотказности эксплуатируемого оборудования прокатного стана – достигается за счет своевременного выявления механизмов, имеющих повышенную вибрацию, определения и устранения (путем проведения ремонтов) неисправностей. Система обеспечивает текущий контроль и диагностирование технического состояния механизмов для предотвращения внезапных отказов и обеспечения целостности корпусных деталей и узлов механизмов. Библиогр. 12, рис. 9.

Ключевые слова: стационарная система вибродиагностики, прокатное оборудование, комплекс «КОРУНД»

Прокатное производство является завершающей фазой металлургического цикла, во многом определяющей качество выпускаемой продукции и производительность металлургического предприятия. Наиболее ответственным оборудованием прокатного производства, характеризующем его эффективность, является прокатный стан. Современный прокатный стан представляет собой сложную механическую систему, функционирующую в режиме тесного взаимодействия отдельных элементов. Непрерывная прокатка, реализуемая на сортовых прокатных станах, обеспечивает одновременную прокатку слитка в нескольких прокатных клетях, что требует высокого уровня автоматизации производства, контроля параметров проката и безотказной работы механического оборудования.

Непрерывный сортовой однокоточный стан 390 состоит из 18 рабочих клеток с индивидуальным приводом, в том числе восьми горизонтальных, четырех вертикальных и шести комбинированных клеток. Клетки установлены последовательно в три группы (черновую, промежуточную и чистовую) – по шесть клеток в каждой. Нагрев исходных заготовок сечением 150×150 и 125×125 мм длиной до 12 м осуществляется в нагревательной печи с водоохлаждаемыми балками с боковой подачей и боковой выгрузкой заготовок с помощью внутрипечных роликов. Стан оборудован холодильником, линиями для регулируемого охлаждения и термоупрочнения готового проката, механизированным участком отделки в потоке.

Максимальная скорость прокатки на стане 18 м/с, расчетная рабочая – от 2,3 до 17 м/с в зависимости от прокатываемого профилеразмера. Стан оснащен автоматизированными системами регулирования и управления режимами прокатки и работой технологических агрегатов, механизмов и устройств, а также промышленными телекамерами обзора невидимых оператору зон и участков технологической линии, мониторы которых установлены на соответствующих постах управления. Прокатка на стане осуществляется с минимальным натяжением в черновой и промежуточной группах клеток и с петлерегулированием в чистовой группе.

Основным конструкторским решением, используемым на среднесортном прокатном стане 390, являются комбинированные клетки, проводящие прокатку в горизонтальных или вертикальных валках, что позволяет выпускать широкий сортамент продукции и быстро осуществлять перестройку режимов. В состав рабочей линии комбинированной клетки входят: прокатная клетка; комбинированный с шестеренной клетью коническо-цилиндрический редуктор (рис. 1), оснащенный механизмом переключения; приводной электродвигатель. Мощность привода прокатной клетки 880 кВт, частота вращения входного вала 300...1000 об/мин, частота вращения выходных валов 10...1000 об/мин.

Фактически стан работает в автоматическом режиме с минимальными плановыми остановками для восстановления работоспособного состояния. Знание фактического состояния механизмов в данном случае необходимо для достижения за-

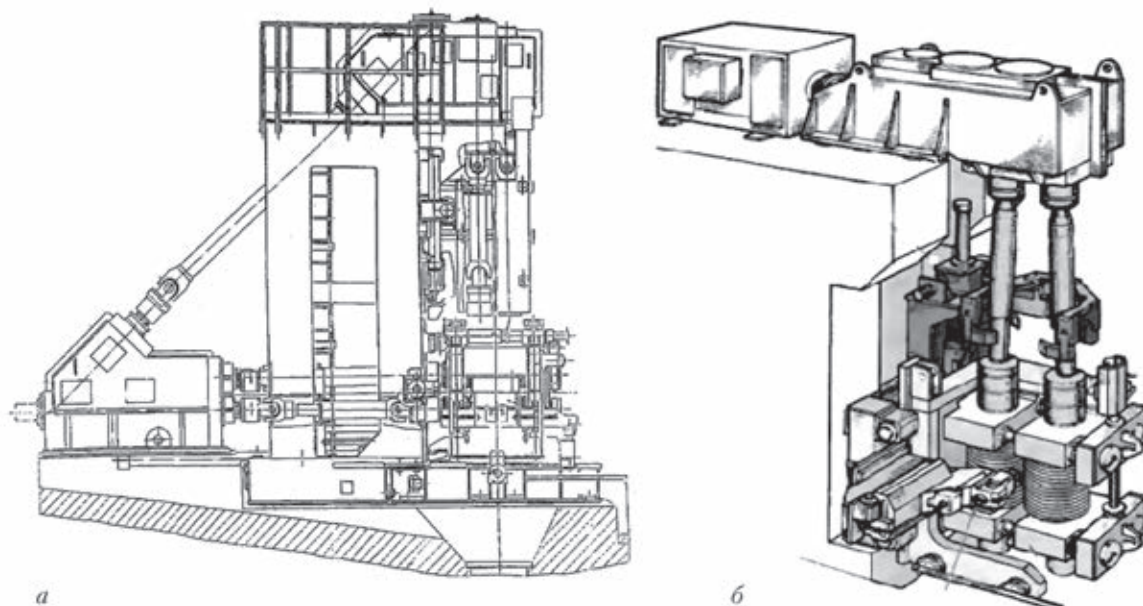


Рис. 1. Общий вид привода валков прокатной клетки: а – вертикальных или горизонтальных чистовой группы; б – вертикальных черновой группы

данных технологических параметров и длительного сохранения работоспособного состояния оборудования. Конструкция комбинированных редукторов (рис. 2) ограничивает доступ к некоторым узлам механизма для определения их технического состояния. Высокая скорость развития повреждений, необходимость согласования выбранных технологических режимов с техническим состоянием редуктора определяют необходимость постоянного контроля вибрационных параметров. Состав контролируемого оборудования – это машины и механизмы, непосредственно участвующие в технологическом процессе, отказ которых вызывает остановку стана. Прокатные клетки: черновой группы (клетки 1...6), промежуточная группа клеток (клетки 7...12), чистовая группа клеток (клетки 13...18).

Оценка состояния механического оборудования в настоящее время в большей степени проводится по значениям вибрационных параметров. Известными решениями является использование стационарных систем, разработанных для роторных машин, работающих в длительном режиме. Основные принципы диагностирования ротор-

ных машин приведены в работах [1–3 и др.], где указывается на необходимость соблюдения стационарности работы исследуемого агрегата в моменты измерений, т. е. сбор информации о состоянии оборудования должен проводиться при неизменной нагрузке, частоте вращения и т. д. В силу особенностей технологического процесса на прокатном стане это условие не выполняется. Основными источниками нестационарности являются [4–8]:

- периодичность процесса проката, при котором циклически чередуются режимы «прокат» и «холостой ход», что приводит к скачкообразным изменениям вибрации в моменты захода заготовки в клетку и выхода из нее, изменению частоты вращения в эти моменты и появлению характерных частот зубозацепления редуктора клетки в момент проката;

- разнообразие сортов проката, что подразумевает разные нагрузки и частоты вращения привода клетки в зависимости от изготавливаемой продукции.

Высокая степень автоматизации, насыщенность механическим оборудованием требует изменения подходов к обеспечению эксплуатационной надежности механического оборудования современных прокатных станов. Безотказная работа комплекса металлургических машин в данном случае не может быть обеспечена традиционными методами периодических осмотров и диагностирования. Необходимо использование стационарных систем диагностирования с использованием комплекса диагностических параметров. Оценка технического состояния металлургического оборудования, работающего при неопределенном нестационарном нагружении, не может проводиться

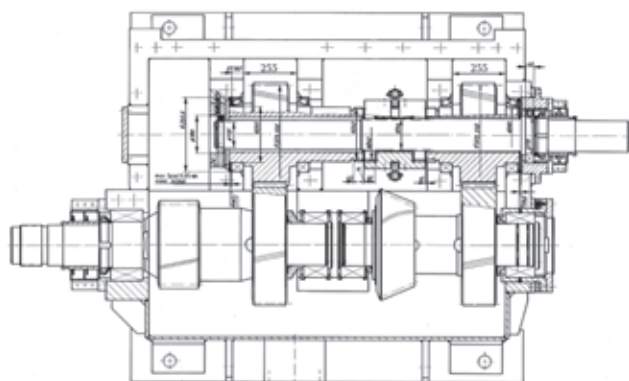


Рис. 2. Комбинированный редуктор привода вертикальных валков прокатной клетки среднесортного прокатного стана



методами, применяемыми на роторных машинах, работающими в длительном режиме.

Предлагаемое ООО «ДИАМЕХ 2000» решение на основе системы «КОРУНД» (рис. 3) учитывает особенности диагностики прокатных станов и предполагает поэтапное внедрение и использование комплекса диагностических параметров для постановки диагноза. Цель разрабатываемой системы – повышение долговечности и безотказности эксплуатируемого оборудования прокатных станов за счет своевременного выявления механизмов, имеющих повышенную вибрацию, определения и устранения (путем проведения ремонтов) неисправностей.

Система должна обеспечить текущий контроль и диагностирование технического состояния механизмов прокатных станов для предотвращения внезапных отказов и обеспечения целостности базовых и корпусных деталей и узлов механизмов. Результаты контроля должны использоваться для принятия решения об аварийной остановке и о необходимости проведения ремонта механизмов.

Решаемые задачи:

- контроль и сигнализация о превышении заданных значений (параметров вибрации, температуры и др.);
- использование для контроля технического состояния токовых характеристик и частоты вращения валов приводных двигателей;
- анализ текущих значений вибрационных параметров, распознавание спектрального состава вибрационного сигнала, характера возможных

повреждений и определение трендов развития повреждений;

- анализ временной реализации вибрационного сигнала и определение степени накопления повреждений при ударных процессах;

- оценка технического состояния контролируемых механизмов, определение времени и объемов ремонтных воздействий;

- накопление и анализ информации о содержании проведенных ремонтов, эффективности воздействий, периодичности замен элементов;

- диагностирование правильности функционирования стационарной системы и предупреждение о возможных неисправностях.

Особенности металлургического производства накладывают жесткие требования к надежности стационарной системы вибродиагностики из-за необходимости работы оборудования в условиях повышенной влажности, запыленности, высоких температур, ударных нагрузок и существенных электромагнитных полей. Поэтому необходима последовательная адаптация устанавливаемой системы к условиям технологического процесса и, как следствие, поэтапное внедрение комплекса.

Предложено три этапа внедрения стационарной системы контроля состояния привода прокатных клетей стана 390 на основе комплекса «КОРУНД».

1. Установка виброаппаратуры, обеспечивающей получение сигналов от первичных преобразователей вибрации о значениях механических

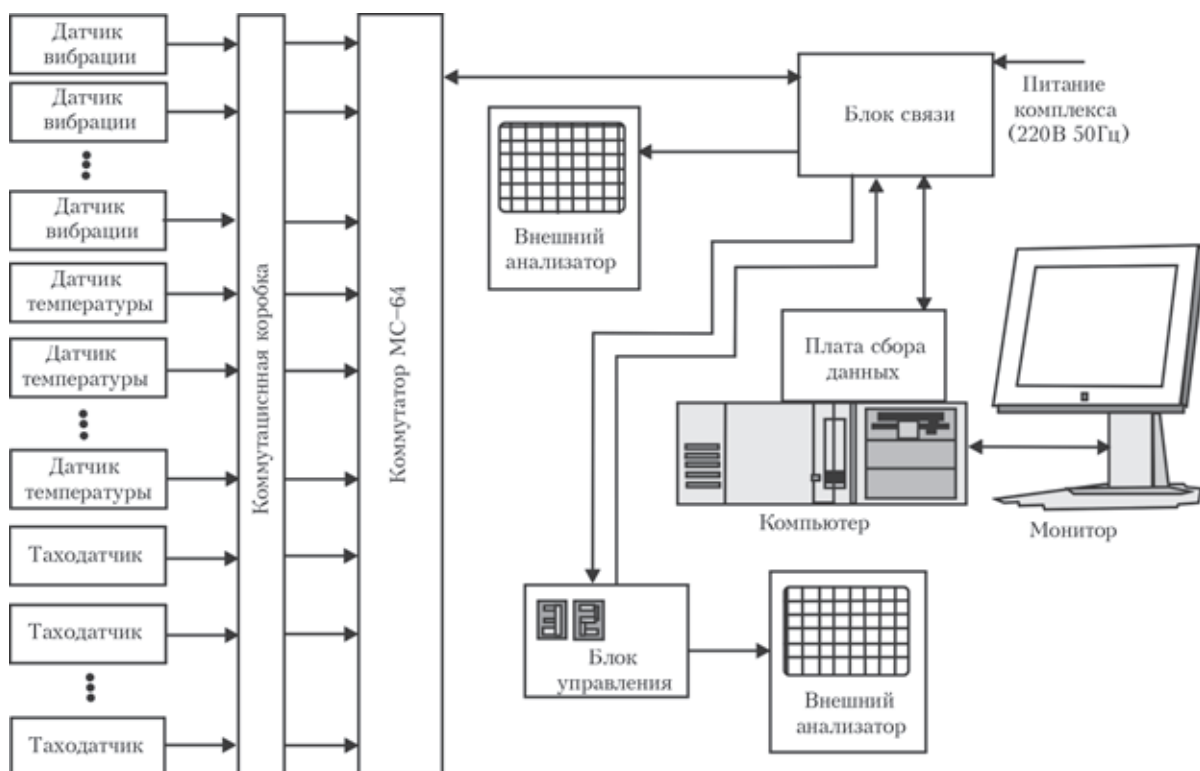


Рис. 3. Структурная схема расширенного варианта системы «КОРУНД»

параметров, их обработку, хранение и предоставление конечному пользователю в удобном виде.

2. Интеграция в АСУТП, позволяющая расширить диагностические возможности за счет мониторинга таких величин, как ток и частота вращения привода, температура подшипников, наличие заготовки в клети.

3. Внедрение программного обеспечения автоматизированной диагностики стана, которая на

основании полученных ранее данных сообщает о вероятности развития дефектов и осуществляет диагностику по техническому состоянию.

В состав оборудования первого этапа комплекса входят (рис. 4):

- первичные преобразователи (датчики АС-104), рассчитанные на работу в условиях прокатного производства;
- блоки коммутации (МС-64), обеспечивающие последовательный опрос большого количества (до 64 вибрационных) измерительных каналов;
- блок связи (БС), собирающий и обрабатывающий сигналы с блоков коммутации;
- сервер «КОРУНД», предназначенный для хранения данных и максимально удобного их отображения для конечного пользователя.

Внедрение стационарной системы вибродиагностики охватывает все необходимые точки контроля на прокатном стане и позволяет собрать данные измерений для оценки технического состояния и принятия решения о продолжении эксплуатации или выводе оборудования в ремонт (рис. 5). Для контроля при помощи стационарной системы выбраны следующие машины: привод прокатных клетей – 18 двигателей и 25 комбинированных редукторов, 5 ножиц горячей и холодной резки. На каждом редукторе установлено по три датчика в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях. На двигателях – в радиальном направлении на каждом подшипнике (рис. 6).

В процессе монтажа системы успешно были решены задачи по установке большого количества датчиков вибрации, в том числе в труднодоступных местах, и коммутирующих блоков, а также прокладке кабельных трасс. Ранее многие точки были практически недоступны для проведения измерений при использовании переносных приборов по соображениям безопасности оператора (наличие раскаленной заготовки, в непосредствен-

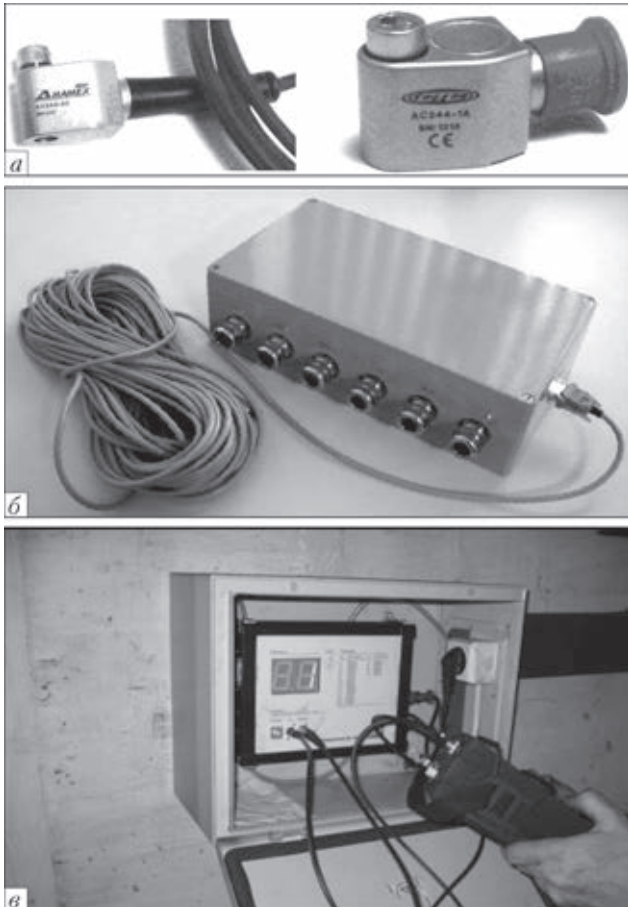


Рис. 4. Основные аппаратные блоки системы «КОРУНД»: а – датчики вибрации; б – коммутирующий блок (МС-64); в – блок связи

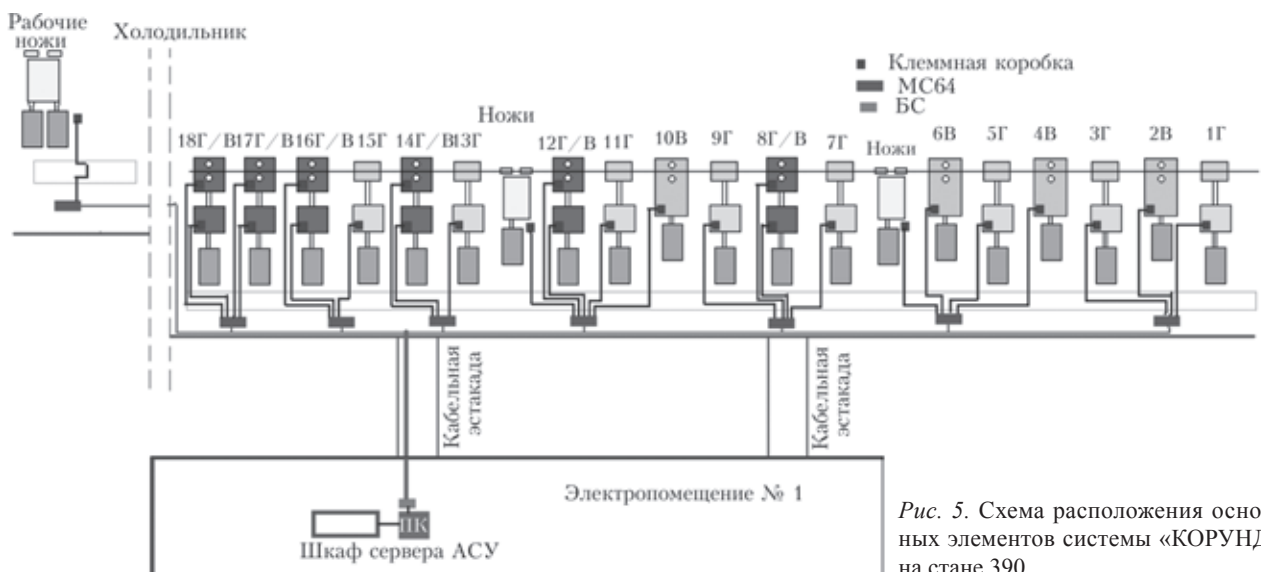


Рис. 5. Схема расположения основных элементов системы «КОРУНД» на стане 390

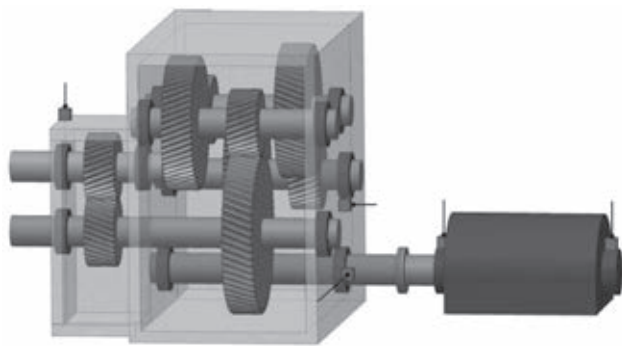


Рис. 6. Расположение датчиков вибрации на двигателе и редукторе привода прокатной клети

ной близости вращающихся шпинделей, водяные пары охлаждения валков и т. д.). Установленные в системе «КОРУНД» первичные преобразователи постоянно подвергаются ударным нагрузкам, воздействию пыли, влаги, высоких температур. Для обеспечения безотказности и надежной работы системы выбраны пыле- и влагозащищенные датчики АС104-1А, выдерживающие высокие ударные нагрузки и температуру до 120 °С.

Для своевременного информирования персонала АСУ о вибрационном состоянии стана, а также для максимального устранения воздействий технологического процесса серверная часть и блок связи комплекса «КОРУНД» установлены в помещении оперативного персонала. В связи с этим длина кабельных линий связи достигает 680 м, что приводит к повышению уровней помех (особенно «сетевой» помехи 50 Гц), потерям пакетов данных.

Эта задача решена путем подключения модулей гальванической развязки ГРА-2 производства ООО «ДИАМЕХ 2000», стабилизирующих входные сигналы датчиков. В то же время блоки коммутации МС-64 должны быть расположены максимально близко к первичным преобразователям, т. е. в условиях сильной запыленности и повышенной (до 80 %) влажности. В связи с этим корпуса МС-64 выполнены в пылезащищенном исполнении (степень защиты оболочки IP65).

Многолетний опыт вибрационной диагностики прокатного оборудования показывает, что процессы усталостного износа ответственных узлов агрегатов протекают весьма медленно [9]. Принимая это во внимание, а также необходимость контроля большого количества точек, оптимальным решением для комплекса вибрационной диагностики прокатного стана является последовательный опрос каналов. Такой подход, в свою очередь, требует высокой точности коммутационного оборудования и надежности его программного обеспечения.

В комплексе «КОРУНД» это реализовано путем циклического программного переключения опрашиваемых каналов из блока связи с после-

дующей цифровой и математической обработкой получаемых данных на сервере. Использование современных технических решений позволяет сократить период опроса одного канала до 12 с, сводя к минимуму вероятность пропуска скачкообразного повышения вибрации.

Программное обеспечение комплекса «КОРУНД», установленное на первом этапе, предлагает удобный интерфейс пользователя, предоставляющий всю необходимую информацию об уровнях и составе вибрации в точках контроля (рис. 7, 8). Комплекс интегрирован в заводскую сеть, что позволяет осуществлять удаленный мониторинг работы прокатного стана.

Второй этап внедрения комплекса «КОРУНД» на стане 390 включает разработку принципов взаимодействия с заводской АСУТП, а именно, получение из нее данных измерений статистических величин, их обработку в программном обеспечении, наложение трендов вибрации на токовые и температурные тренды, разграничение режимов проката и вывод предупреждающих и аварийных сигналов в систему управления прокатным станом.

Важными диагностическими параметрами являются частота вращения и токовые характеристики приводного двигателя. Так, например, прекращение подачи смазочного материала к узлам комбинированного редуктора привода верти-

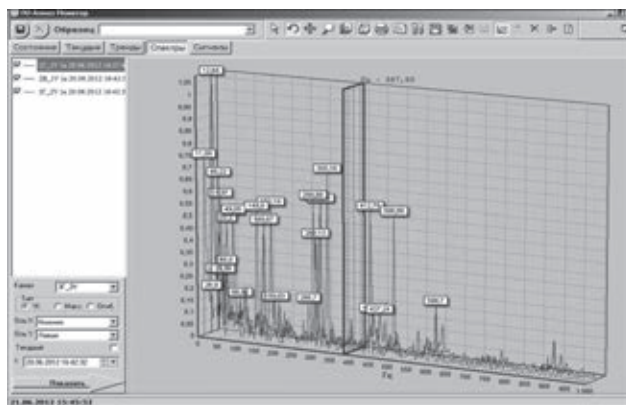


Рис. 7. Пример отображения спектра в ПО комплекса «КОРУНД»



Рис. 8. Общая схема стана в ПО комплекса «КОРУНД»

кальных валков прокатной клетки сортового стана (рис. 2) привело к внеплановой остановке стана. По результатам анализа токовых характеристик и графиков частоты вращения в развитии повреждения отмечены два периода: период устойчивой часовой работы (рис. 9, а) и период развития повреждения (рис. 9, б). Возникновение первого периода обусловлено наличием масляной пленки на поверхности контактирующих деталей. Развитие повреждения происходило быстро, в течение трех минут и привело к разрушению зубьев конической передачи из-за смещения валов при износе подшипников.

Результатом заключительного, третьего этапа внедрения комплекса должна стать автоматизированная система вибродиагностики, способная на основании заложенных экспертных правил анализировать совокупность скалярных данных, тренды и спектральный состав вибрации и выдавать заключения о состоянии оборудования и прогнозировать развитие повреждений.

Для составления экспертных правил необходимо накопление замеров вибрации узлов стана с учетом различных режимов работы (при разном сортаменте, в условиях рабочего холостого хода), данных, полученных из АСУТП, и архива работы ремонтной службы. Сведения о проведенных

ремонтах, их эффективности, характерных неисправностях и причинах износа также должны использоваться при построении диагностических правил. Учитывая конструктивную сложность прокатного оборудования, разнообразие прокатных станов и режимов работы, важным требованием к программной части системы является возможность адаптации ее экспертного модуля к конструктивным и технологическим особенностям диагностируемого оборудования – наличие экспертной системы открытого типа [8].

Основными предпосылками эффективности и достоверности технического диагностирования оборудования и технологического процесса можно назвать следующее [10, 11]:

- оборудование и технологический процесс должны иметь техническую возможность и готовность к диагностированию состояния;
- необходимы специалисты, которые имели бы опыт решения задачи технического диагностирования, соответствующее образование и квалификацию;
- необходима разработка новых научных положений, которые бы определяли что, как и когда диагностировать.

Классификация систем технической диагностики, проведенная с учетом главных выполняемых функций, изложенных в работах [11, 12], позволяет выделить следующие уровни диагностических систем.

Отображение состояния – обнаружение отклонений в работе механизмов по признакам, которые определяются органами чувств человека.

Контроль и защита – измерение контролируемого параметра, сравнение его с заданной (нормативной) величиной и защитное отключение оборудования при достижении нормативной величины.

Управление техническим состоянием по фактическим характеристикам контролируемых параметров оборудования и технологического процесса во времени.

Прогнозирование – идентификация и управление явлениями, предшествующими появлению диагностических признаков развитых повреждений.

Оптимизация – управление работой оборудования и технологическим процессом по диагностическим признакам.

В настоящее время реализация диагностической системы «КОРУНД» относительно оборудования стана 390 имеет 2-й уровень, выполняя функции контроля, а при необходимости защиты. Создание алгоритмов управления по диагностическим параметрам оборудования в настоящее время является актуальнейшей задачей современности. Возможности системы (разработка экспертного модуля и соответствующего программ-

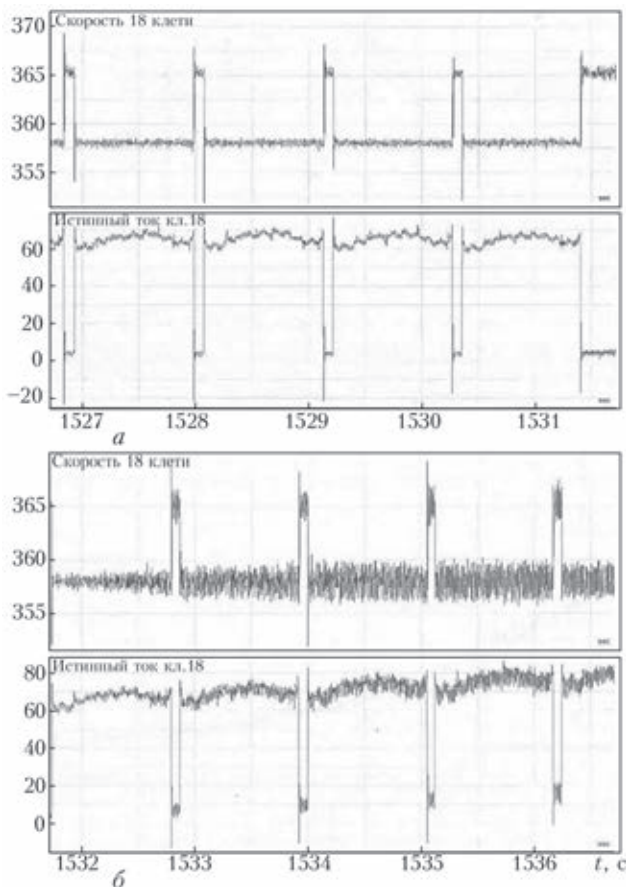


Рис. 9. Изменение токовых параметров и частоты вращения двигателя привода прокатной клетки: а – при номинальном режиме; б – при развитии повреждения



ного обеспечения) позволяют выполнить развитие системы (на той же элементной базе) до 3-го и далее до 4-го уровня, что предполагается реализовать на последующих этапах внедрения в соответствии с требованиями заказчика.

1. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
2. Вибродиагностика / Г. Ш. Розенберг, Е. З. Мадорский, Е. С. Голуб и др. / Под ред. Г. Ш. Розенберга. – СПб: ПЭИПК, 2003. – 284 с.
3. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М.: Машиностроение, 1996. – 276 с.
4. Сушко А. Е. Методология внедрения аппаратно-программных средств мониторинга технического состояния и диагностики прокатных станов по различным параметрам вибрации // Сталь. – 2011. – № 5. – С. 60–65.
5. Гайгемюллер Г., Клаппорт У., Лейтриц У. Диагностика агрегатов в прокатных цехах // Черные металлы. – 1996. – № 12. – С. 48–50.
6. Мекел Дж., Геронт В., Аш. А. Применение компьютеризированных систем наблюдения и диагностики на прокатных станах // Черные металлы. – 1999. – № 12. – С. 53–60.
7. Сушко А. Е., Демин М. А. Вибродиагностика в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. – № 1. – С. 6–9.
8. Радчик И. И., Рябков В. М., Сушко А. Е. Комплексный подход к вопросам надежности работы основного и вспомогательного оборудования современного металлургического производства // Оборудование. Технический альманах. – 2006. – № 1. – С. 24–28.
9. Тараканов В. М., Скворцов О. Б., Сушко А. Е. Системы непрерывного контроля по вибрационным параметрам // Вибрация машин: измерение снижение защита. – 2006. – № 3. – С. 48–54.
10. Технические средства диагностирования: Справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др. / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
11. Ницета В. В., Сидоров В. А. Класифікація вібросистем. // Нафтова та газова промисловість. – Київ, 2009. – № 1. – С. 47–50.
12. Ницета В. В. Системы автоматизированного управления – классификация и применение // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2009. – № 4. – С. 36–41.

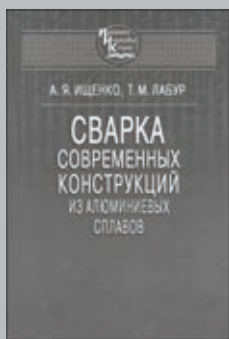
The paper deals with an example of realization of a stationary vibrodiagnostics system «KORUND» for combined reduction gears and drive motors of medium-section rolling mill 390. The proposed solution allows for the features of rolling mill diagnostics and involves step-by-step introduction and application of a set of diagnostic parameters for diagnosing. Main objective of improvement of fatigue life and reliability of operated mill equipment is achieved at the expense of timely detection of mechanisms with higher vibration, detection and elimination of faults (by conducting repair). System ensures monitoring and diagnosis of technical condition of mechanisms to prevent sudden failures and ensure the integrity of casing parts and mechanisms. References 12, Figures 9.

Keywords: stationary vibrodiagnostic system, rolling equipment. «KORUND» complex

Поступила в редакцию
27.09.2013

НОВАЯ КНИГА

Ищенко А. Я., Лабур Т. М. **Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов.** – Киев: Наук. думка, 2013. – 416 с.



В монографии рассмотрены системы легирования алюминиевых сплавов, классификация полуфабрикатов и сварочных материалов, а также их структура и свойства. Представлены сведения об основных способах сварки плавлением и в твердой фазе.

Приведены результаты изучения процесса разупрочнения металла при сварочном нагреве, а также информация о свойствах сварных соединений при действии статических и циклических нагрузок, характере разрушения и коррозионной стойкости.

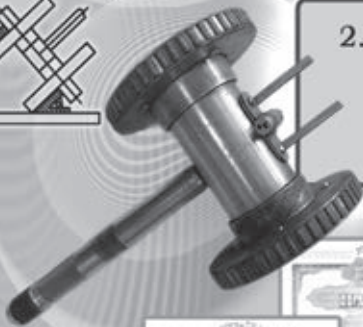
Для научных работников, инженеров металлообрабатывающих и машиностроительных предприятий, применяющих алюминиевые сплавы, а также преподавателей и студентов высших учебных заведений соответствующих специальностей.



Сканирующие подвижные устройства локального намагничивания ферромагнитных изделий (металлоконструкций) для магнитной дефектоскопии



1. Намагничивающие устройства со сменными дискообразными магнитными полюсами и дополнительными полюсными элементами. Подвижность и разнонаправленность намагничивания обеспечивает новые технологические возможности, позволяет снизить трудоёмкость процесса контроля, повысить производительность и выявляемость дефектов. Возможны поисковый и оценочный режимы обнаружения индикаций.



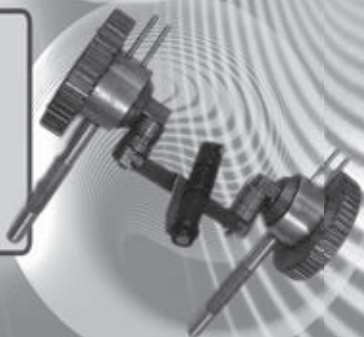
2. Намагничивающие устройства с повышенной магнитной проводимостью зоны контакта полюсов с контролируемым изделием за счет расположения по периферии пазов с подвижными элементами.



3. Многопрофильные намагничивающие устройства, адаптируемые к любым геометрическим особенностям поверхности контроля. Сменные полюсные наконечники крепятся на матрице и повторяет профиль поверхности.



4. Намагничивающие устройства с независимым перемещением каждого из полюсов. Предназначены для контроля крупногабаритных изделий сложной конфигурации, таких как, например, тележки, обода и другие элементы железнодорожного транспорта.





5. Мобильные намагничивающие устройства с одним полюсом, расположенным на подвижной платформе. Устройства имеют один подвижный полюс, в виде платформы с роликами и полюс стационарный, переставляемый в процессе контроля. Магнитопровод выполняется в виде троса или набора пластин.



6. Намагничивающие устройства с подвижным полюсом в виде катка. Предназначено для контроля в поисковом режиме при любых конфигурациях изделий. Второй полюс может быть неподвижным или комплектоваться роликовой платформой.



7. Многофункциональные устройства, ширина зоны контроля которых зависит от расстояния между дополнительными полюсными катками. При увеличении расстояния между катками, изменяется ширина зоны эффективного локального намагничивания.



8. Намагничивающее устройство с выдвинутой зоной локального намагничивания. Предназначено для магнитопорошкового контроля протяженных объектов больших площадей, например, днищ резервуаров и т.п.





20-я ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

3–6 марта 2014 г. в Москве состоялись 20-я Всероссийская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика (НКТД)» и выставка «Территория NDT». Такие конференции один раз в три года организует Российское общество НКТД в различных городах Российской Федерации.

На пленарном заседании были заслушаны четыре доклада. Академик РАН *Клюев В. В.* рассказал и продемонстрировал фильм о Научно-исследовательском институте интроскопии (НИИИН), который в этом году отмечает 50-летие. НИИИН – первый советский институт, созданный для развития методов и средств неразрушающего контроля. Академик РАН *Клюев В. В.* с 1970 г. возглавляет этот уникальный творческий коллектив, вошедший в первый ряд фирм мира, работающих в области НКТД.

Академик РАН *Горкунов Э. С.*, директор Института машиноведения Уральского отделения РАН, сообщил об исследованиях различных состояний остаточной намагниченности и их устойчивости к внешним воздействиям.

Профессор *Вавилов В. П.* из Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета проанализировал развитие теплового контроля композиционных материалов в авиакосмической промышленности и перспективы его практического применения.

Доклад известного итальянского ученого *Джузеппе Нардони* был посвящен пятой годовщине международной Академии неразрушающего контроля, инициатором создания которой он был. На сегодня членами Академии являются 126 ученых мира. Почетным членом Академии избран *Патон Б. Е.*, а членами Академии от Украины – *Троцкий В. А.*, *Казакевич М. Л.* и *Учанин В. Н.*

Более 180 докладов было представлено в работе 12-ти секций конференции: магнитные методы НКТД; электромагнитные методы НКТД; акустические методы НКТД; радиационные методы НКТД; оптические, тепловые, микроволновые методы НКТД; течеискание и капиллярные методы НКТД; методы НКТД остаточного ресурса; Вибродиагностика; акустическая эмиссия; антитеррористическая диагностика; сертификация персонала, стандартизация и метрология в НКТД; Academia NDT International.

На стендовой сессии конференции было представлено 35 докладов.

Доклады конференции продемонстрировали высокий уровень исследований и разработок в области неразрушающего контроля. С программой конференции, сборниками тезисов и докладов можно ознакомиться в офисе УО НКТД.

Доклады конференции продемонстрировали высокий уровень исследований и разработок в области неразрушающего контроля.

Одновременно с конференцией прошла выставка средств и технологий НКТД – «Территория NDT», в которой участвовало более 100 экспонентов, среди которых крупнейшие российские фирмы, производящие средства НКТД: МНПО «Спектр» (г. Москва); НИИИН (г. Москва) и др.

Интересные стенды представили крупнейшие международные фирмы, имеющие свои представительства в Москве: AGFA, Fujifilm, GE Measurement & Control, GE Sensing & Inspection Technologies, Starmans electronics, YXLON International GmbH, Olympus, Sonatest, Socomate, TesTex, NEC, Helling, Technatom, Karl Deotsch.

Следует отметить, что на двух стендах была представлена продукция украинских фирм. Стенд ООО «Промприбор» (г. Москва) представлял средства НК, разработанные и изготовленные в Киеве ООО «Ультракон-Сервис», ООО «Промприлад» и УкрНИИНК. Это отечественные ультразвуковые, магнитные и вихретоковые дефектоскопы, автоматизированные установки для контроля конкретных объектов и многое другое.

Стенд ООО «Специальные Научные Разработки» демонстрировал ультразвуковые толщиномеры с магнитоакустическими преобразователями, коэрцитиметры и другие приборы.

Отдельную группу стендов занимали национальные общества НК, и в частности Украинское общество НКТД. На стенде общества была представлена информация по основным методам контроля качества и разработках ряда предприятий и организаций Украины (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, ООО «Дисит» и др.).

В работе конференции и выставки участвовали многие специалисты из Украины: *Мозговой А. В.*, *Луценко Т. М.*, *Безлюдько Г. Я.*, *Галаненко Д. В.*, *Годлевский В. С.*, *Дружинин В. И.*, *Павлий И. В.*, *Павлий А. В.*, *Звягин В. А.* и др.

*Посыпайко Ю.Н.,
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины*

ПОДПИСКА — 2014

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
160 грн.	320 грн.	900 руб.	1800 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.



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

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

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
В 2014 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2012 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вкладышах следующих размеров

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

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации. Все файлы в формате IBM PC
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

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

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (техническая диагностика и неразрушающий контроль)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

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

Подписано к печати 25.04.2014. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 4 цв. вклейки.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.