Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и Неразрушающий контроль

№ 2, 2013

Издается с января 1989 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ Главный редактор Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
Н. П. Алешин, В. Л. Венгринович,
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,
В. В. Клюев, А. А. Лебедев,
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,
Г. И. Прокопенко, В. А. Стороженко,
В. А. Стрижало, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150, ул.Боженко, 11 Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины Тел.: (044) 205-23-90 Факс: (044) 200-54-84, 200-82-77 E-mail: journal@paton.kiev.ua URL: www.rucont.ru

> Научные редакторы Н. Г. Белый, А. А. Грузд Редактор

Т. В. Юштина

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа

Свидетельство о государственной регистрации КВ4787 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» переиздается в полном объеме на английском языке под названием «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» издательством «Cambridge International Science Publishing», Великобритания

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Недосека А.Я., Недосека С.А. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 1
Недосека А.Я., Недосека С.А., Бойчук О.И. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2
Осташ О.П., Ківа Д.С., Учанін В.М., Семенець О.І., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В. Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації15
Боряк К.Ф., Манзарук М.А. Оценка работы испытательного станда ИГК-90.1 и анализ результатов испытаний гидравлических гасителей колебаний
Венгринович В.Л., Денкевич Ю.Б., Герловский С.А. Исследование остаточных деформаций в трещине в результате ее повторяющегося нагружения в упругопластической области
Юхимец П.С., Рыбаков А.А., Нехотящий В.А., Филипчук Т.Н. Гидроиспытания трубных секций с коррозионными поврежде- ниями в режиме малоциклового нагружения
<i>Банахевич Ю.В., Банахевич Р.Ю.</i> Досвід ідентифікації виявлених дефектів внутрішньотрубною діагностикою в ДК «УКРТРАНСГАЗ»40
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ
<i>Максимов А. Б.</i> Определение марки стали стальных прутков с помощью коэрцитиметра «СИЛА»47
<i>Тороп В.М., Яхно Б.О.</i> Определение зон дополнительного контроля металла и сварных соединений парогенераторов ПГВ-213 при оценке прочности
Блинов Ю.Н. Особенности обследования технического состояния металлических конструкций высотных сооружений с помощью методов неразрушающего контроля и промышленного альпинизма. Рекомендации по восстановительным работам
ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ
Юбилейная сессия общего собрания Национальной академии наук Украины
Практический семинар по применению ультразвуковых фазированных решеток63
12-я Международная выставка «NDT Russia» и новая выставка «TechTest»

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ: Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТК-78 Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

Quarterly Scientific-Technical and Production Journal

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA

№ 2, 2013

NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Founded in January, 1989

Publisher: International Association «Welding»

Founders: The National Academy of Sciences of Ukraine The E. O. Paton Electric Welding Institute International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
N. P. Aleshin, V. L. Vengrinovich,
E. F. Garf, A. A. Gruzd,
E. A Davydov, A. T. Zelnichenko,
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,
L. M. Lobanov, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, Yu. N. Posypayko,
G. I. Prokopenko, V. A. Storozhenko,
V. A. Strizhalo, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,
E. V. Shapovalov, V. E. Shcherbinin

Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine Tel.: (044) 200-23-90, Fax: (044) 200-54-84, 200-82-77 E-mail: journal@paton.kiev.ua URL: www.rucont.ru

Scientific editors

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Editors T. V. Ushtina

Electron galley L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

State Registration Certificate KV 4787 of 09.01.2001. All rights reserved

This publication and each of thearticles contained here in are protected by copyright.

Permission to reproduce material contained in this journal must beobtained in writing from the Publisher

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

CONTENT

SCIENTIFIC-TECHNICAL

Nedoseka A. Ya. Influence of local accumulation of defects on propagation of acoustic emission waves. Information 1
Ostash O.P., Kiva D.S., Uchanin V.M., Semenets O.I., Andreiko I.M., Golovatyuk Yu.V. Diagnostics of technical condition of aircraft structures after long-term service
<i>Boryak K.F., Manzaruk M.A.</i> Evaluation of operation of testing facility IGK-9.1 and analysis of the results of testing hydraulic vibration suppressors
<i>Vengrinovich V.L., Denkevich Yu.B., Gerlovskii S.A.</i> Investigation of residual deformations in the crack as a result of its repeated loading in the elasto-plastic region
Yukhimets P.S., Rybakov A.A., Nekhotyashchii V.A., Filipchuk T.N. Hydraulic testing of pipe sections with corrosion damage in the mode of low-cycle loading
Banakhevich Yu.V., Banakhevich R.Yu. Experience of identifica- tion of detected defects by in-pipe diagnostics in SC "UKRTRASGAZ"40
INDUSTRIAL
<i>Maximov A.B.</i> Determination of steel grade of rods using "SILA" coercive force meter
<i>Torop V.M., Yakhno B.O.</i> Determination of zones of additional control of metal and welded joints of steam generators PGV-213 at strength assessment
<i>Blinov Yu.N.</i> Features of examination of technical condition of metal structures of high-rise buildings using NDT and industrial alpinism methods. Recommendations on reconditioning operations57
NEWS AND INFORMATION
Jubilee session of the General Meeting of the National Academy of Sciences of Ukraine

Practical seminar on application of ultrasonic phased arrays for	
testing power equipment6	3
12th International Exhibition "NDT Russia" and new exhibition	

"TechTest"65

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

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Сообщение 1

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

Рассмотрены изменения параметров сигналов при АЭ сканировании протяженных элементов конструкций типа стержней с дефектами, сосредоточенными в некоторой ограниченной области. Предполагается, что совместное применение методов АЭ и АЭ сканирования может повысить точность прогнозирования состояния диагностируемых материалов. Получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать возбужденное внешним источником волновое поле в стержне с учетом влияния коэффициента сопротивления среды на параметры сигнала АЭ. При этом расчеты можно выполнять как с постоянным сопротивлением среды по всей длине образца, так и сосредоточенным в некотором сечении с координатой z_0 . Получены численные значения коэффициента сопротивления среды для различных объемов дефектов, накопленных в процессе разрушения образцов из стали 20. Показано, что ограниченная область материала с дефектами структуры оказывает существенное влияние на распространение АЭ волны. Локальное скопление дефектов вызывает искажение распространение АЭ волны. Локальное скопление дефектов вызывает искажение распространятия элементов конструкций методом сканирования. Результаты применения аналитической модели сканирования образцов в широком спектре излучения позволили расширить диапазон оценок выявления мест с повышенным содержанием дефектов и показали удовлетворительную сходимость с данными эксперимента, что свидетельствует о возможности применения метода для совершенствования общей технологии оценки состояния конструкций. Библиогр. 9, табл. 1, рис. 8

Ключевые слова: АЭ, АЭ сканирование, дефект, сопротивление среды, аналитический расчет, стержень

Многолетний опыт работы ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по оценке состояния сварных конструкций методом АЭ и созданные для этих целей технологии контроля дали положительные результаты по достоверности таких оценок, а использование теории распознавания образов в алгоритмах прогноза позволили нормировать эти оценки с определенной заданной вероятностью и погрешностями [1]. В то же время исследования сканирования материалов в широком спектре частот, характеризующих АЭ [2-5], показали, что эта методика может быть использована для повышения точности и надежности таких оценок. При этом АЭ и АЭ-сканирование могут применяться совместно, дополняя друг друга [6, 7]. Незначительные объемы выполненных экспериментальных исследований пока не позволяют сделать окончательные выводы по нормированному применению методики на реальных конструкциях. Ожидаемые результаты требуют более детальной проработки вопроса. Требуемый объем этих исследований достаточно велик, как и их стоимость. Поэтому весьма актуальным становится наряду с экспериментами использовать технологию математического моделирования процессов сканирования с тем, чтобы заполнить те пробелы в эксперименте, которые по тем или иным причинам затруднительно перекрыть опытным путем. Моделирование в данной работе проведено приме-© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, 2013

нительно к длинным стержням, характерным для многих сварных конструкций, и позволяет уточнить экспериментальные данные на образцах с тем, чтобы в последующем перейти к реальным конструкциям.

Пусть имеется стержень длиной *a*, в котором на расстоянии z_0 в результате деформирования в небольшой области материала возникло повышенное сопротивление передвижению АЭ импульса. Указанное изменение свойств материала в сечении $z = z_0$ можно оценить изменением скорости распространения акустической волны в этом сечении по сравнению с базовой скоростью C_1 (рис. 1). Дифференциальное уравнение, описывающее кинетику колебаний стержня при указанных условиях, будет:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \delta(z - z_0) \beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0, \qquad (1)$$

где u – перемещения материала стержня в направлении оси z, см; C_1 – скорость распространения волн в бездефектном материале, см/с; β – коэффициент сопротивления среды перемещающемуся АЭ импульсу; $\delta(z - z_0)$ – дельта функция, определяющая сосредоточенность и координату области сопротивления, 1/см.

Выражение (1) показывает, что в определенном сечении стержня на расстоянии z_0 от источника излучения интегрально сосредоточены дефекты структуры материала. Другими словами, сечение

АУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

 $z = z_0$ является условно сборным для всех дефектов, расположенных в непосредственной близости к сечению z_0 с двух сторон от него.

Выполнив прямые интегральные преобразования Лапласа по времени и конечное преобразование Фурье по координате z [6, 7], после необходимых алгебраических вычислений и обратных преобразований получим для перемещения u следующие выражения¹:

$$\begin{split} u &= -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0 C_1 \cos(\omega_n z)}{a \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \cos^2(\omega_n z_0)}{a}t\right) \times \\ &\times \sin\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}}\right), \end{split} (2) \\ &\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2} > 0; \\ u &= -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0 C_1 \cos(\omega_n z)}{a \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \cos^2(\omega_n z_0)}{a}t\right) \times \\ &\times \sin\left(C_1 t \sqrt{\left|\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2}\right|}\right), \end{aligned} (3) \\ &\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \cos^4(\omega_n z_0)}{a^2} < 0. \end{split}$$

Здесь ω_n – положительные корни трансцендентного уравнения

$\sin(\omega_n a) = 0.$

Таким образом, распространение сигнала АЭ в стержне описывается последовательно двумя аналитическими выражениями. Первое из них соответствует случаю, когда величина волнового числа ω_n меньше правой части подкоренного выражения. В этом случае перемещения распространяются без колебаний. Второе выражение вступает в силу, когда ω_n становится больше правой части и обеспечивает колебательный процесс рас-

пространения упругой волны АЭ. Как видно из формулы, АЭ сигнал затухает с течением времени. Этот процесс усиливается с увеличением коэффициента β, харак-



Рис. 1. Цилиндрический стержень с областью повышенного сопротивления материала распространению волны: 1 – начальная деформация ε_0 ; 2 – перемещающийся АЭ импульс; 3 – область повышенного сопротивления

теризующего плотность дефектов, возникающих в структуре материала при его деформировании. Перемещения стержня также зависят от его длины, уменьшаясь с ее увеличением. Следует также отметить, что наличие границ стержня по его длине вызывает возникновение колебательного процесса в перемещениях.

Исследование особенностей распространения АЭ волн в стержне с дефектами структуры материала проводили на модели длиной 10,6 см. При этом исследовалось влияние величины коэффициента сопротивления среды распространению сигнала в дефектной области В и места ее расположения на оси z. Экспериментальную часть работы выполняли на стандартных цилиндрических образцах (рис. 2). Образец из стали 20 растягивался на разрывной машине до определенных реперных точек, показанных на графике (рис.3, б, точки на зеленой кривой). После этого испытания останавливали, образец освобождали из захватов машины и выполнялось его сканирование, как показано на рис. 2. Затем образец вновь устанавливали в захватах разрывной машины и продолжалось его растяжение до следующей реперной точки. Процедуру повторяли, обеспечив прохождение всей шкалы деформирования, вплоть до разрушения.

В таблице представлены значения коэффициентов b, полученные при сканировании образцов из стали 20 на различных стадиях деформирования (ϵ). Результаты поэтапного сканирования фиксировались аппаратурой ЕМА 3.9. Типичные графики акустической активности материала в процессе накопления повреждений при растяжении образцов из стали 20 и результаты средних значений параметров АЭ сканирования для 20 таких образцов представлены на рис. 3. Из графика рис. 3, a видно, что накопление повреждений в материале образца постепенно увеличивается с

Значения коэффициентов сопротивления среды *b* = *C*₁β

ε, %	1,5	2,5	6,0	7,5	9,0	13	19	22,5	25	27	28
$b = C_1 \beta$	0,1	0,4	0,44	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,94	4	6
β·10 ⁶ ,с/см	0,2	0,8	0,88	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,88	8	12

¹ Подробные выкладки по выводу формул для расчета перемещений *и* не приводим из-за их громоздкости. Вывод выражений (2), (3) читатель может легко сделать по методике, описанной в работах [1, 5, 8].



Рис. 2. Образец в захватах разрывной машины Р20 и схема сканирования: 1 – образец; 2 – захваты машины Р20; 3 – излучающий и принимающий АЭ датчики



Рис. 3. АЭ в процессе накопления повреждений и разрушения образца из стали 20 при растяжении на машине Р20 (*a*) и результаты АЭ сканирования серии цилиндрических образцов с разными концентраторами из стали 20 на разных стадиях деформирования (*б*)[7]





Рис. 4. Условный коэффициент сопротивления среды $b=\beta C_1$ в зависимости от величины деформации образца, перемещения конечного торца образца *и* и амплитуда *А* сигнала АЭ импульса при соответствующей данной деформации величины *b*

Рис. 5. Изменение параметра Райс тайм (R_t) для двух точек деформирования образцов – βC_1 =0,44 (синяя кривая) и βC_1 =4 (красная)

– НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 🍃

ростом его деформации, приобретая лавинообразный характер на заключительных стадиях. Этот процесс достаточно хорошо отображает постадийное АЭ сканирование материала, фиксирующее постепенное ослабление амплитуды сигнала АЭ и увеличение его длительности по мере увеличения количества дефектов (рис. 3, *б*).

На следующем этапе были выполнены аналитические расчеты с тем, чтобы определить величины коэффициентов сопротивления среды β, обусловленные увеличением количества пустот, связанных с деформированием образца в соответ-



Рис. 6. Перемещение волны АЭ в стержне длиной 4,8 (*a*) и 10 см (δ) при различных значениях коэффициента $C_1\beta$ и координаты локального сосредоточения дефектов z_0 . Условное время $C_1t = 4,8$ см (t = 9,6 мкс) и $C_1t = 1$ см (22 мкс)



Рис. 7. Распространение АЭ волны в стержне длиной 50 см. Координата сечения с повышенным сопротивлением показана на графике, на срезе момент времени *t* = 98 мкс



Рис. 8. Влияние постепенного перемещения переднего фронта волны по стержню длиной 100 см на амплитуду АЭ сигнала в конечном его торце (b = 2; $\varepsilon_0 C_1 = 1$ см; $z_0 = 20$ см)

ствии с проведенными экспериментами. На рис. 4 представлены результаты расчетов коэффициента β (на графике $b = \beta C_1$) в зависимости от относительной деформации ε и показано его влияние на величину амплитуды импульса АЭ и перемещения, формирующиеся на выходном торце образца. Расчеты параметров АЭ выполнялись по приведенной ниже формуле, где β есть постоянное по всей длине стержня значение коэффициента сопротивления среды. Формула получена в результате решения дифференциального уравнения (1) для случая, когда параметр локальности $\delta(z - z_0)$ отсутствует:

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

В случае, если под корнем отрицательное число, то вместо (sin) подставляется (sh).

Аналитические исследования хорошо коррелируют с данными эксперимента, полученными при сканировании 20 образцов из стали 20, приведенными на рис. 3, б. Аналитические исследования изменения времени нарастания АЭ импульса (Rt) представлены на рис. 5 и показали существенное отличие от экспериментальных данных по величине, хотя тенденция по росту *Rt* с увеличением степени деформации образца сохранилась. Можно полагать, что разница между результатами эксперимента по сравнению с аналитическими расчетами может скрываться в особенностях методики измерения параметра Rt прибором АЭ. В то же время, как и в эксперименте, с увеличением величины пластической деформации є растет время нарастания АЭ сигнала до его максимального значения.

Следует отметить, что при незначительных величинах коэффициента β на конце стержня появляется достаточно чётко выраженный импульс АЭ (рис. 5, синяя кривая). С увеличением величины β импульс постепенно исчезает и процесс распространения АЭ волны становится плавным без скачков, время изменения сигнала АЭ становится длительным (рис. 5, красная кривая). Такая ситуация естественно скажется на приеме волны АЭ датчиком. Датчик может просто не среагировать на столь медленное изменение сигнала.

Расчет распространения АЭ волн в случае, когда дефекты сосредотачиваются локально в определенных местах несущих элементов конструкций, был выполнен по формулам (1), (2) с использованием полученных выше значений коэффициента В. Расчеты выполнялись для противоположного удару торца образца при z = a, где устанавливается АЭ датчик, принимающий сигнал. Установлено достаточно существенное влияние замедляющей распространение АЭ волны преграды. Как видно из приведенных на рис. 6 графиков, это влияние выражается в резком по сравнению с бездефектным материалом изменением распределения перемещений вдоль образца. Двигающаяся волна как бы отражается от препятствия, находящегося на расстоянии z₀. Из рисунка также видно уменьшение амплитуды сигнала АЭ на противоположном торце стержня с увеличением b. Чем выше это сопротивление, тем меньше амплитуда суммарного сигнала на торце стержня. Перемещение полосы сопротивления ближе к противоположному торцу стержня также сказывается на параметрах АЭ импульса. На графиках рис.6 для стержня длиной 10 см показано распределение амплитуд сигналов АЭ по оси z при очень больших значениях величины b. Видно, что сигнал практически не преодолевает сопротивления и становится ничтожно малым (рис. 6, б, красная кривая).

При сканировании стержня длиной 50 см картина распределения перемещений по его длине на первый взгляд мало отличается от рассмотренных выше стержней длиной 4,8 и 10 см. Исключение составляют торцы на расстояниях 10 и 50 см от начала координат для стержней длиной 10 и 50 см, где более резко проявляются пиковые значения амплитуд. Видна также достаточно четкая зависимость амплитуды сигнала от величины коэффициента b, уменьшающаяся с увеличением этого коэффициента и увеличивающаяся с ростом длины стержня. Особенности распределения амплитуд АЭ сигнала появляются с появлением области с повышенным сопротивлением среды перемещению импульса. На рис.6 и 7 это хорошо видно. Там, где распространяющаяся волна при отсутствии сопротивления (b = 0) не имеет «провалов», например, участок в районе 10 см (рис.7), при появлении сопротивления в этом месте появляется «провал» амплитуды, увеличивающийся с ростом коэффициента b. На рис. 7 эта область заключена внутри эллипса. На рис. 8 приведены графики волны, распространяющейся в стержне длиной 100 см, для случая, когда область повышенного сопротивления (дефектная область) расположена на расстоянии 20 см от источника возбуждения. Постепенное со временем перемещение переднего фронта волны приводит к существенным изменениям амплитуды АЭ сигнала на конечном торце. Сравнивая графики на рис. 6–8, можно заметить влияние длины стержня на величину и характер продольных перемещений.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

В заключение следует отметить, что характер распределения перемещений по длине и на торцах стержня достаточно сложный, зависит от многих параметров и для выявления особенностей, связанных с появлением и ростом дефектности структуры материалов, требует более детального анализа на базе полученных аналитических зависимостей. Объем настоящей статьи не позволяет представить такие исследования, хотя полученные аналитические зависимости носят общий характер и дают эту возможность.

Формулы для расчета перемещений, вызванных воздействием начального импульса на переднем торце стержня, сложны и требуют специальных подходов для реализации на персональных компьютерах. Скорость счета и ошибки в его результатах в сильной мере зависят от построения программы для ЭВМ. Поэтому для проведения вычислений была создана и исследована специальная программа. Программа позволила выполнить эти вычисления. Основной трудностью при организации компьютерного счета является достаточно слабая сходимость суммы по волновым числам ω_{p} . В программе учтены эти особенности и для стержней незначительной длины точность расчетов укладывается в принятые нормы до 5 %. Далее программа передавала информацию в MS Excel для представления результатов в виде таблиц и графиков.

Выводы

Получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать возбужденное внешним источником волновое поле в стержне с учетом влияния коэффициента сопротивления среды β на параметры сигнала АЭ. При этом расчеты можно выполнять как с постоянным значением β по всей длине образца, так и сосредоточенным в некотором сечении с координатой z_0 . Получены численные значения коэффициента β для различных объемов дефектов, накопленных в процессе разрушения образцов из стали 20.

Ограниченная область материала с дефектами структуры оказывает существенное влияние на распространение АЭ волны.

Результаты применения аналитической модели сканирования образцов в широком спектре излучения позволили расширить диапазон оценок выявления мест с повышенным содержанием дефектов и показали удовлетворительную сходимость с данными эксперимента. Последнее свидетельствует о возможности применения метода для совершенствования общей технологии оценки состояния конструкций.

- Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е.Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
- 2. *Недосека С. А., Богинич И. О.* Применение аппаратуры «ЕМА» для оценки поврежденности стали 20 акустическим методом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 1995. №1. С. 66–69.
- 3. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А. Моделирование процесса накопления повреждений в деформируемом материале по его акустическим свойствам // Вестник Севастоп. гос. ун-та. – 2000. – №2. – С. 18–21.
- Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А.А.Лебедев, А.Я.Недосека, Н.Г.Чаусов, С.А.Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. –2001. – № 1. – С. 8–12.
- Механіка руйнування і міцність матеріалів/ Під ред. В.В. Панасюка. Довід. посіб. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т.Назарчука. – Львів: ФМІ, 2001. – 1132 с.
- Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. – 2010. – № 1. – С. 9-16.
- Недосека С. А. Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии. Дис....д-ра техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2010. – 469 с.
- Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. –М.: Наука, 1971. – 288 с.
- 9. Трантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.

The paper deals with changes of signal parameters at AE scanning of extended structural elements of the type of rods with defects, concentrated in a certain limited region. It is anticipated that simultaneous application of AE and AE scanning methods can increase the accuracy of prediction of diagnosed material state. Analytical dependencies were derived, allowing calculation of a wave field excited by an external source in a rod, taking into account the coefficient of medium resistance to AE signal parameters. Calculations can be performed both at constant medium resistance along the entire sample length, and with resistance concentrated in a certain section with coordinate z_0 . Numerical values of the coefficient of medium resistance were derived for various volumes of defects, accumulated during failure of samples from steel 20. It is shown that a limited area of material with structural defects has an essential influence on AE wave propagation. Local defect accumulation causes a distortion of the propagating sound wave with pronounced features, which can be used at evaluation of the condition of structural elements by the method of scanning. Results of application of analytical model of sample scanning in a broad radiation spectrum allowed widening the range of assessment of detection of locations with an increased defect number, and demonstrated a satisfactory convergence with the experimental data that is indicative of applicability of the method to improve the general technology of evaluation of the structure condition.

K e y w o r d s : AE, AE scanning, defect, medium resistance, analytical calculation, rod

Поступила в редакцию 08.01.13

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Сообщение 2

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

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

Рассмотрены особенности распространения в тонком стержне упругих волн, вызванных мгновенным приложением импульсной нагрузки к одному из его торцов. Проанализировано влияние на параметры сканирующих волн распределения дефектов в некотором докальном протяженном объеме и оценены возможные преимущества учета указанного фактора. Получена математическая модель распространения АЭ волны в коротком стержне с областями, пораженными дефектами. Разработаны оптимальные способы расчета и созданы необходимые программы для MS Windows, позволившие выполнять расчетные работы в оптимальные сроки и с приемлемой для оценок физического явления точностью. Программы реализованы таким образом, чтобы исследователь мог достаточно просто оперировать настройками и получать результаты расчетов в виде графиков с возможностью их перестраивания в наиболее удобную для анализа форму. Установлено, что наличие протяженной области локально распределенных дефектов структуры материала, например, при его деформировании, меняет характер распространяющейся по стержню волны. Показана зависимость характерных особенностей этого изменения от протяженности поврежденного участка, что дает возможность анализа этого фактора при оценке появления и развития дефектов в материалах. Показано, что наличие в стержне сосредоточенных дефектов в тонком поперечном сечении образца или в протяженной области меняет форму проходящей акустической волны в сторону снижения амплитуды и уменьшения крутизны переднего фронта. Полученное решение предоставляет возможность оценивать накопление повреждений (дефектов) в материалах образцов по результатам их сканирования акустическими импульсами. Библиогр. 6, рис. 8.

Ключевые слова: АЭ, АЭ сканирование, импульсная нагрузка, дефект, сопротивление среды, аналитический расчет, стержень, программа

Влияние дефектов структуры материала на распространение упругих волн в случае сосредоточения всех дефектов, появившихся в материале, в локальной тонкой плоскости, перпендикулярной оси стержня, было рассмотрено в работе [1]. Были обнаружены особенности в характере распространяющейся волны и показана возможность использования разработанной методики при контроле состояния конструкций с дефектами путем их сканирования акустическими сигналами, возбуждаемыми датчиками АЭ (метод АЭ сканирования [2, 3]). В настоящей работе проанализировано влияние на параметры сканирующих волн распределения дефектов в некотором локальном протяженном объеме и оценены возможные преимущества учета указанного фактора.

Итак, пусть, как и в работе [1], к одному из торцов стержня мгновенно приложена нагрузка Р, вызывающая такую же мгновенную начальную деформацию ε_0 (рис. 1). Указанная деформация вызовет появление в стержне упругой волны, описать которую можно дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - [S(z-b_2) - S(z-b_1)\beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0.$$

Предположим, что дефекты структуры мате-

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук, 2013

риала распределены равномерно в исследуемом объеме от b_1 до b_2 и создаваемое ими сопротивление материала стержня распространению упругих волн может быть описано при помощи коэффициента β . Здесь, как и ранее, C_1 – скорость распространения базовой волны, см/с; u – продольные перемещения сечений стержня, см; t – время, с; S – единичная функция; b_1 и b_2 – координаты области повышенного сопротивления распространения распространения с

Функция $[S(z - b_2) - S(z - b_1)]$ имеет особенности в точках b_1 и b_2 . Чтобы избежать трудностей, связанных с этими особенностями при решении уравнения, изменим его, представив в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \delta(z - z_0)\beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0.$$



Рис. 1. Цилиндрический тонкий стержень с локально распределенной областью дефектов структуры

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Решение этого уравнения в предположении бесконечно тонкой прослойки с дефектами на расстоянии z_0 от начала стержня получено ранее [1]. Воспользовавшись этим решением, определим изменение *и* в зависимости от изменения β . Найдя эту зависимость, проинтегрируем полученный результат по β и координате z_0 в пределах от b_1 до b_2 .

После выполнения преобразования Лапласа по времени и прямого, а затем обратного преобразования Фурье по координате *z* получим (здесь *а* – длина стержня, см; ε_0 – начальный импульс относительного перемещения переднего торца стержня) [3–6]:

$$\overline{u_n} = \begin{cases} \frac{4\varepsilon_0 \beta C_1^2 p \cos^2(\omega_n z_0)}{a^2 \left(\omega_n^2 + \frac{p^2}{C_1^2}\right) \left[p^2 + 2p\beta C_1^2 \frac{\cos^2(\omega_n z_0)}{a} + \omega_n^2 C_1^2\right]} \\ - \frac{2\varepsilon_0}{a \left(\omega_n^2 + \frac{p^2}{C_1^2}\right)} \end{cases} \cos(\omega_n z).$$

Найдем приращение функции u_n в зависимости от β в виде дифференциала. Последний будет равен:

$$d\overline{u_n} = \frac{\partial \overline{u_n}}{\partial \beta} \partial \beta = \frac{4\varepsilon_0 C_1^4 \cos^2(\omega_n z_0) \cos(\omega_n z)}{a^2} \times \frac{p}{\left[p^2 + 2p\beta C_1^2 \frac{\cos^2(\omega_n z_0)}{a} + \omega_n^2 C_1^2\right]^2} d\beta.$$

После интегрирования по β и выполнения обратного преобразования Лапласа полученного выражения в предположении, что $du = \varepsilon_p dz$, где ε_p – равномерно распределенное по координате z_0 значение перемещений du, для u получим:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{b_{1}}^{b_{2}} \frac{2\varepsilon_{0}C_{1}\cos(\omega_{n}z)}{a(b_{2}-b_{1})} \frac{\exp(-\frac{\beta C_{1}^{2}t}{a}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0}))}{\sqrt{\omega_{n}^{2} - \frac{\beta C_{1}}{a^{2}}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0})}} \times \\ \times \sin\left(C_{1}t\sqrt{\omega_{n}^{2} - \left(\frac{\beta C_{1}}{a}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0})\right)^{2}}\right)dz_{0},$$

ECJIM $\omega_{n}^{2} - \left(\frac{\beta C_{1}}{a}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0})\right)^{2} > 0, \mathbb{N}$
 $u = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{b_{1}}^{b_{2}} \frac{2\varepsilon_{0}C_{1}\cos(\omega_{n}z)}{a(b_{2}-b_{1})} \times \\ \times \frac{\exp\left(-\frac{\beta C_{1}^{2}t}{a}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0})\right)}{\sqrt{\left(\omega_{n}^{2} - \frac{\beta_{1}C_{1}}{a}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0})\right)^{2} - \omega_{n}^{2}}} \times$

$$\times \operatorname{sh}\left(C_{1}t\sqrt{\omega_{n}^{2} - \left(\frac{\beta C_{1}}{a}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0})\right)^{2}}\right)dz_{0}$$

сли $\omega_{n} - \frac{\beta C_{1}}{a}\cos^{2}(\omega_{n}z_{0}) < 0.$

e

Величины ω_n являются корнями трансцендентного уравнения $\sin(\omega_n a) = 0$.

Следующим важным этапом в исследовании процессов распространения упругих волн в стержнях стал вопрос создания необходимого инструмента для выполнения расчетов по приведенным формулам. Рассматриваемые физические процессы достаточно сложны и описываются весьма сложными математическими зависимостями. К сожалению, других, более простых путей решения данной проблемы авторам неизвестно. В этой ситуации разработка оптимальных способов расчета, создание необходимых программ и выбор соответствующих компьютерных средств приобретают самостоятельное важное значение.

Как видно из полученных аналитических выражений, расчет перемещений в стержне является достаточно громоздким и требует специальных программ, которые бы давали возможность выполнить расчетные работы в оптимальные сроки и с приемлемой для оценок физического явления точностью. Необходимо, чтобы исследователь мог достаточно просто оперировать такой программой и получать результаты расчетов в виде графиков с возможностью их перестройки в более удобные к требованиям анализа формы.

Такая программа была создана для персональных компьютеров с операционной системой Microsoft Windows (протестирована в версиях Windows 7 и 8). Расчетная программа написана при помощи пакета Microsoft Visual Studio, для вывода окончательных результатов в виде таблиц и графиков она интегрирована через COM – интерфейс с пакетом Microsoft Office 10.

На рис. 2 показано рабочее окно программы. Как видим, оператору необходимо только установить исходные параметры для расчета, подобранные в зависимости от требуемого результата и точности, с которой он должен быть получен (параметры числа разбиений в интеграле и число членов суммы). Таким образом, установив количество членов суммы в поле ввода числовых данных для ω_{n} , число разбиений подынтегральной функции в поле N и введя необходимые исходные данные расчета для решения той или иной задачи, получаем графики, описывающие математическую модель исследуемого явления. Меняя исходные данные и пользуясь табличными и графическими возможностями Microsoft Excel, можно получить достаточный объем информации и

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 2. Рабочее окно программы для расчета продольных перемещений в тонком длинном стержне с дефектами структуры материала

ее удобное наглядное представление для анализа процессов распространения волн при прозвучивании стержней с дефектами структуры.

Получив необходимые математические зависимости и средства их реализации в практических задачах, приступим к анализу влияния расположения и плотности дефектов в длинных тонких стержнях на характер и амплитуды упругих волн. В качестве исходных данных расчета были приняты следующие величины: a = 10 см; $C_1 \varepsilon_0 = 10^{-4}$ см; $\omega_n = 400$ см. Остальные данные приводятся на соответствующих графиках. Значение величины ε_0 выбирали из условия воздействия силы на торец стержня в начале координат, равной $P = 0,5 \cdot 10^{-4}$ кг при площади поперечного сечения стержня, равной F = 0,5 см² ($\varepsilon_0 = P/EF$).

Анализируя графики на рис. 3, можно увидеть, что сопротивление материала стержня, заполненного внутренними дефектами в виде несплошностей структуры или, иными словами, накопленными в материале повреждениями, приводит к существенному изменению переднего фронта рас-



Рис. 3. Перемещения в стержне при постоянном значении b по всей длине стержня, $C_1 t = 4$ см



Рис. 4. Перемещения в стержне при сосредоточении дефектов в плоскости на расстоянии $z_0 = 8$ см; $C_1 t = 4$ см; $\varepsilon_0 C_1 = 1$ см пространяющейся по стержню волны.

Чем больше определяющий степень повре-

жденности материала коэффициент $b = C_1\beta$, тем более пологой становится волна, тем менее выраженным становится передний фронт. Эта тенденция хорошо видна на графике при b = 4 и b = 50. Резко выраженный фронт волны становится плавным, распределенным по длине стержня.

Если дефекты сосредоточены в некоторой небольшой локальной области стержня (например, при $z_0 = 8$, как показано на рис. 4), то картина меняется, и крутой передний фронт волны сохраняется при всех значениях коэффициента *b*. При этом изменяется лишь его значение, уменьшаясь по мере увеличения *b*.*

Если область с дефектами имеет определенную протяженность, которой нельзя пренебречь



Рис. 5. Перемещения на торце стержня при z = 8 см в зависимости от времени и коэффициента $b = C_1 \beta$

^{*} Графики на рис. 3 и 4 получены по формулам, приведенными в работе [1]



Рис. 6. Перемещения в стержне длиной 8 см в более широкой области с дефектами (*a*), ширина областей затемнена; δ – постепенное движение импульса АЭ вдоль стержня ($C_1 t$ – первая цифра в обозначениях под графиком) и распределение перемещений в стержне при коэффициенте b = 0 и 2, $C_1 \varepsilon_0 = 1$ см⁻¹. В обоих случаях при b = 0; ∞ стержень полубесконечный, $C_1 \varepsilon_0 = 1$ см⁻¹



Рис. 7. Влияние частотной характеристики АЭ датчиков на амплитуду перемещений в стержне. Под рисунками приведены значения частотных характеристик трех типов датчиков с полосой пропускания сигналов α равной 0,1...10; 1...6 и 0...50 см⁻¹



Рис. 8. Перемещения, вызванные волной, распространяющейся в длинных стержнях. Синим и красным цветом показаны области с дефектами (цвет соответствует кривой распределения); Темно-синим и голубым цветом показаны перемещения двигающейся волны в стержне полубесконечных размеров (П/Б)

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

в расчетах (показана на рис. 1 между координатами b_1 и b_2), то результат изменения параметров акустической волны в этом случае следует получать с учетом фактора протяженности по приведенным выше формулам. На рис. 5 представлены результаты расчета для случая, когда область с дефектами сосредоточена в объеме с координатами границ $b_1 = 3,5$ см и $b_2 = 4,5$ см. Как видно из рисунка, местное протяженное распределение дефектов оказывает существенное влияние на распространение волны по сравнению со случаем равномерного распределения дефектов и случаем, когда дефекты сконцентрированы на очень малой длине. Сосредоточение дефектов в локальной области стержня приводит к излому кривых распределения перемещений по сравнению с бездефектным образцом. При этом наклон кривых распределения в сторону оси тем больший, чем выше коэффициент b. Графики на рис. 6 показывают влияние протяженности области с дефектами на перемещения поперечных сечений стержня. Увеличенная по длине область включает в себя большее количество дефектов. Из рис. 6, а видно, как изменяются перемещения на конечном торце стержня с увеличением дефектности образца за счет их протяженности и количества. Видно, что с увеличением области повышенного сопротивления и роста числа дефектов амплитуда импульсов уменьшается. Графики также наглядно показывают, что на величину перемещений оказывает влияние положение фронта распространяющей волны.

Плотность дефектов, как было сказано, определяется величиной коэффициента $b = C_1\beta$ и рассматривалась в двух вариантах: b = 8 и 16. Рис. 6, б с областью распределенных дефектов с b = 0 и 2, расположенной в центре стержня, показывает уменьшение амплитуды импульса с увеличением коэффициента b. Графики, приведенные на рис. 6, показывают, что на конечном торце стержня (образца) в зависимости от объема дефектной области существенно изменяются величины перемещений, что позволяет описать процесс накопления дефектов в материале при его деформировании. Если на конечном торце разрушаемого образца установить датчик акустической эмиссии, а на начальном торце излучатель, то такое сканирование материала, постепенно накапливающего дефекты, позволит отслеживать этот процесс и оценивать его критичность. Там же на графике (рис. 6, δ) представлена волна, распространяющаяся в стержне полубесконечных размеров. Видно, что величина амплитуды сигнала в связи с отсутствием сопротивления *b* и отражающей сигнал границы неизменна.

Графики на рис.7, *а* показывают, что частота пропускания датчика заметно влияет на результат сканирования по сравнению с широкополосным

датчиком. Незначительное сужение полосы несущественно влияет на результат (на графике синяя и розовая кривые). Сужение полосы пропускания до 1...6 см⁻¹ приводит к сильному искажению кривой распределения перемещений в стержне (кривая зеленого цвета), что необходимо учитывать при выборе датчика и излучателя.

На графиках рис. 7, б приведены также значения амплитуд импульсов АЭ, распространяющихся в стержне полубесконечных размеров. Видно, что с увеличением сопротивления материала стержня распространению волны происходит достаточно интенсивное ее затухание. В то же время необходимо отметить, что волновое поле в этом случае не подвержено искажению за счет отраженных волн, их не существует. Сжимающий импульс начального воздействия на свободный торец стержня передается по стержню без искажений в случае отсутствия сопротивления материала стержня и с плавно уменьшающейся амплитудой при наличии затухания. Расчеты выполнялись по формуле, полученной при решении приведенного выше дифференциального уравнения в предположении, что стержень полубесконечен. Формула в этом случае принимает вид:

$$\begin{split} u &= -\frac{2\varepsilon_0 C_1}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}} \times \\ \times \left[\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\beta C_1^3 t^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}}{\left(\frac{\beta C_1^2 t}{2} - (C_1 t)^2 \left(1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2\right) + S\frac{\pi}{2}\right)}\right) \right]. \\ \text{Следует отметить, что если} \\ \left(\frac{\beta C_1^2 t}{2}\right)^2 - (C_1 t)^2 \left(1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2\right) + z^2 < 0, \text{ то } s = 1; \\ \text{если} \left(\frac{\beta C_1^2 t}{2}\right)^2 - (C_1 t)^2 \left(1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2\right) + z^2 \ge 0, \text{ то } s = 0, \\ 1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2 > 0. \end{split}$$

На рис. 8 представлены перемещения в стержне конечных размеров длиной 100 см. Как видно из рисунка, наличие границ приводит к появлению отраженных волн и искажению основных волн, которые в начальные моменты времени передают заданный сжимающий импульс, а далее происходит наложение волн и перемещения меняют знак. В полубесконечном стержне этого не происходит. На рисунке приведено распределение перемещений в стержне с отсутствующим конеч-

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

ным торцом (полубесконечный стержень) для двух случаев - без сопротивления материала стержня распространению волны и при наличии такого сопротивления с коэффициентом b = 0.5. Отрицательный импульс в первом случае продолжает двигаться не изменяясь, во втором – амплитуда плавно меняется, а импульс теряет свой явно выраженный передний фронт. Как можно заметить, амплитуда импульсов в обоих случаях не меняет знак, оставаясь все время отрицательной. Расположение области с дефектами незначительно влияет на распределение перемещений на конечном торце ограниченных по размеру стержней. Расчет перемещений для этих стержней выполнялся при длине области с дефектами, равной 1 см, а сами области располагалась на расстоянии 25 и 60 см от переднего торца стержня.

В заключение отметим, что характер распределения дефектов в образцах при их растяжении и наличие конечного торца стержня оказывают существенное влияние на форму и амплитуду распространяющейся акустической волны, а аналитическая модель, построенная на базе проделанных работ, позволяет в широком диапазоне изменения параметров сканирования качественно и количественно показать как именно это происходит.

Приведенный на графиках характер изменения акустических параметров в целом соответствует результатам уже проведенных экспериментальных исследований и численного моделирования, выполнявшегося авторами ранее (в частности, имеется в виду структурная модель накопления повреждений и его влияния на параметры АЭ сканирования [2, 3]).

Выводы

Получена математическая модель распространения генерируемой АЭ волны в коротком стержне с областями, пораженными дефектами.

Показано, что наличие в стержне сосредоточенных дефектов в тонком поперечном сечении образца или в протяженной области меняет форму проходящей акустической волны в сторону снижения амплитуды и уменьшения крутизны переднего фронта.

Полученное решение предоставляет возможность оценивать накопление повреждений (дефектов) в материалах образцов по результатам их сканирования акустическими импульсами.

- 1. *Недосека А. Я., Недосека С. А.* Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 1 // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 2013. №2. С. 3–8.
- Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А. Моделирование процесса накопления повреждений в деформируемом материале по его акустическим свойствам // Вестник Севастоп. гос. ун-та. – 2000.– С. 38–42
- 3. *Недосека С. А.* Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии. Дис. ... д-ра техн. наук. Киев. 2010. 469 с.
- Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под редакцией Б.Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
- Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
- Трантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.

The paper deals with the features of propagation of elastic waves in a thin rod caused by instantaneous application of pulsed load to one of its edges. Influence of defect distribution in a certain local extended volume on scanning wave parameters is analyzed, and possible advantages of allowing for the above factor are evaluated. Mathematical model of AE wave propagation in a short rod with regions affected by defects was derived. Development of optimum calculation procedures and required programs for MX Windows was performed that allowed conducting calculation operations in optimum terms and with an accuracy acceptable for evaluation of a physical phenomenon. Programs are realized so that an investigator could readily enough perform the adjustments and obtain calculation results in the form of graphs with the possibility of their re-adjustment in a form convenient for analysis. It is established that presence of an extended region of locally-distributed defects of material structure, for instance at its deformation, changes the nature of the wave propagating through the rod. Dependence of characteristic features of this change on the damaged area extent is shown that enables analyzing this factor at evaluation of defect initiation and propagation in materials. It is shown that presence of concentrated defects in a rod in a thin sample cross-section or in an extended area changes the shape of passing acoustic wave towards amplitude lowering and reduction of leading front steepness. Derived solution enables assessment of damage (defect) accumulation in sample materials by the results of their scanning by acoustic pulses. 6 References, 8 Figures.

K e y w o r d s : AE, AE scanning, pulsed load, defect, medium resistance, analytical calculation, rod, program

Поступила в редакцию 28.02.2013

ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАКОНСТРУКЦІЙ ПІСЛЯ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. П. ОСТАШ¹, Д. С. КІВА², В. М. УЧАНІН¹, О. І. СЕМЕНЕЦЬ², І. М. АНДРЕЙКО¹, Ю. В. ГОЛОВАТЮК¹

¹Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail:pminasu@imp.lviv.ua

²ДП «АНТОНОВ»,03062, м. Київ, вул. Туполєва, 1. E-mail:info@antonov.com

Обгрунтовано необхідність врахування деградації конструкційних матеріалів при оцінюванні залишкового ресурсу елементів авіаконструкцій після довготривалої експлуатації. Подано результати дослідження деградації властивостей алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 обшивки крила літака Ан-12 після експлуатації впродовж 40 років, яка проявляється, у першу чергу, у зниженні їх пластичності (відносного видовження δ) і характеристик циклічної тріщиностійкості (порога втоми ΔK_{ih} і циклічної в'язкості руйнування ΔK_{jc}). Показано, що зниження механічних характеристик цих сплавів пов'язане зі змінами їх тонкої структури і мікромеханізмів руйнування, які залежать від навантаженості різних зон крила. Встановлено, що за зміною питомої електропровідності деградованих сплавів можна виконувати достовірний моніторинг цього процесу. Представлено прилади для вихрострумового неруйнівного контролю деградації структури і механічних характеристик алюмінієвих сплавів. Констатовано, що необхідно створювати нову базу даних про кореляційні залежності механічних і фізичних характеристик конструкційних алюмінієвих сплавів після тривалої експлуатації, оскільки наявні довідникові дані, отримані для термооброблених сплавів у стані постачання, для цього непридатні.

Ключові слова: елементи авіаконструкцій, тривала експлуатація, деградація матеріалів, структура, механічні характеристики, структуроскопія, вихрострумовий метод

Безпечне відпрацювання призначених ресурсів літаків та їх продовження після довготривалої експлуатації - це актуальна науково-технічна і економічно важлива проблема. Призначений термін служби, тобто календарна тривалість експлуатації літака, при досягненні якої її слід припиняти незалежно від його стану, для літаків типу «Антонов» становить 40 тис. год (без заміни частин планера), у тому числі до появи тріщин – 30 тис. го. При цьому економічно вигідний технічний ресурс з ремонтом і заміною окремих частин планера становить 60 тис. год. Тобто приблизно половину технічного ресурсу літак повинен гарантовано експлуатуватися без пошкоджень, а решту - з допустимими пошкодженнями елементів конструкцій та їх заміною під час ремонту. При цьому пошкодження допускають, у першу чергу, в конструкції крила і фюзеляжу, які найбільше сприймають експлуатаційні впливи. Тому можна суттєво продовжити тривалість експлуатації авіаконструкцій, встановлену на стадії проектування, яку визначали за принципом безпечного ресурсу, котрий не допускає виникнення пошкоджень. Це зумовило новий підхід до визначення ресурсу літаків за принципом допустимої пошкоджуваності (damage tolerance concept) або підвищеної живучості [1]. Тоді особливого значення набувають розрахунки безпечної пошкоджуваності конструкції літака, які у першу чергу ґрунтуються на методах механіки руйнування.

Механіка руйнування авіаконструкцій і деградація конструкційних матеріалів. Визначаючи технічний стан і залишковий ресурс авіаконструкцій під час тривалої експлуатації, необхідно розрізняти поняття деградації елементів конструкцій і конструкційних матеріалів [1]. Деградація елемента конструкції – це накопичення корозійних (загальна, локальна і міжкристалітна корозія) та механічних і корозійно-механічних дефектів (макротріщин), які зумовлюють падіння його несучої здатності. Оцінюють це явище засобами дефектоскопії, тобто встановлюють місцезнаходження, кількість і розміри дефектів. Надалі деякі з них усувають під час ремонту, а інші враховують, визначаючи напружено-деформований стан елемента конструкції з дефектами (тріщинами) і його ресурс за вихідними (як на стадії проектування) механічними характеристиками конструкційних матеріалів. Саме такий підхід переважно використовують на даний час для оцінювання довговічності старіючих літаків (aging aircraft) за кордоном [2, 3] і в Україні [4, 5].

Проте залежно від технології виробництва матеріалів і умов експлуатації їх характеристики можуть змінюватися, відбувається деградація матеріалів – зміна під час тривалої експлуатації їх вихідного структурно-фазового стану і мікроструктурна пошкоджуваність (утворення вакансій, пор, скупчень дислокацій, мікротріщин), які знижують функціональні (службові) характеристики конструкційних матеріалів. Сьогодні це

© О. П. Осташ, Д. С. Ківа, В. М. Учанін, О. І. Семенець, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк, 2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

практично не враховують під час встановлення залишкового ресурсу елементів авіаконструкцій. Однак його можна надійно оцінити тільки на основі характеристик міцності, витривалості і тріщиностійкості, що властиві матеріалам у заданий момент часу їх служби. Тому для розрахунку необхідно знати значення поправочних коефіцієнтів, за якими встановлюють, наскільки змінилися ці характеристики порівняно з вихідними (у стані постачання) властивостями матеріалу. В літературі представлено незначну кількість досліджень, присвячених цьому питанню [6–9].

Деградацію властивостей конструкційних матеріалів можна оцінювати руйнівними і неруйнівними методами. Першими на основі випробувань так званих зразків-свідків чи зразків, вирізаних з тривало експлуатованих елементів авіаконструкцій на етапі їх капітального ремонту чи зняття з експлуатації, встановлюють істинні ресурсні характеристики матеріалів. Показано [7], що найбільше погіршення (тобто чутливість до деградації) демонструють (рис.1) характеристики пластичності (відносне видовження δ) і циклічної тріщиностійкості (номінальний ΔK_{th} і ефективний $\Delta K_{th eff}$ пороги втоми і циклічна в'язкість руйнування ΔK_{c}) алюмінієвих сплавів типу Д16 (система Al-Cu-Mg) i B95 (система Al-Zn-Mg-Cu) – вітчизняних аналогів зарубіжних сплавів типу 2024 і 7075, які є основними матеріалами конструкції планера літака (фюзеляжа і крил). На підставі характеристик циклічної тріщиностійкості можна оцінити втомну довговічність N_r елементів авіаконструкцій [10, 11] і встановити понижувальний поправочний коефіцієнт [7]

$$\eta_M = N_f^{\text{derp}} / N_f^{\text{BUX}} \tag{1}$$



Рис. 1. Вплив модельної деградації на механічні характеристики алюмінієвих сплавів Д16чТ (*a*) і В95пчТ1 (б) (λ – відношення характеристик матеріалу в деградованому і вихідному станах)

для розрахунку залишкового ресурсу з урахуванням деградації конструкційних матеріалів.

Однак вказаний вище руйнівний підхід неможливо застосовувати під час експлуатації авіаконструкцій, де (на відміну, наприклад, від атомної техніки) не застосовують зразки-свідки. Тому моніторинг їх експлуатаційної деградації можна проводити лише неруйнівними методами. Як було відзначено вище, процес деградації визначається структурно-фазовим станом і мікроструктурною пошкоджуваністю матеріалів. В результаті такий неруйнівний контроль можна здійснювати за зміною їх структурно-чутливих фізичних характеристик, використовуючи засоби і методи структуроскопії – це встановлення мікроструктурних і механічних параметрів матеріалів за вимірами питомої електропровідності, коерцитивної сили, магнітної проникності, термоелектрорушійної сили тощо, ґрунтуючись на кореляційних залежностях між цими характеристиками матеріалів. Таким чином, структуроскопія відіграє особливу роль для моніторингу деградації авіаційних матеріалів і встановлення періодичності контролю авіаконструкцій тривалої експлуатації. Оскільки основні конструкційні матеріали для обшивки фюзеляжу і крил літаків – це алюмінієві сплави, які є неферомагнетиками, то для таких елементів авіаконструкцій засоби структуроскопії побудовані на вимірюваннях питомої електропровідності матеріалів.

Структурно-механічна залежність електропровідності алюмінієвих сплавів. Фізико-механічні властивості металів і сплавів суттєво залежать від ступеня спотворення кристалічної гратки, кількості наявних в ній дефектів тощо [12]. Зокрема, питомий електроопір ρ обумовлений розсіюванням електронних хвиль на неоднорідностях кристалів, тобто пов'язаний з хвильовою природою електронів [12]. Він є оберненою величиною до питомої електропровідності: $\chi = 1/\rho$. Фізична природа електропровідності визначається рухливістю вільних електронів, тому значення χ залежить від площі поверхні Фермі A і довжини вільного пробігу l електронів [13]:

$$\chi = \alpha_1 l A , \qquad (2)$$

де $\alpha_1 = 2e^2 / 3h^3$; *h* – постійна Планка; *e* – заряд електрона.

Параметр *l* залежить від структури кристалічної гратки (віддалі між атомами), тому відоме наступне співвідношення [14]:

$$\chi = \alpha_2 d , \qquad (3)$$

де $\alpha_2 = \frac{e^2 E n_0}{\pi m k T V_T N_0}$; *E* – напруженість електрично-

го поля; n_0 – кількість вільних електронів в одиниці об'єму; m – маса спокою електрона; k –постійна

Больцмана; T – температура; V_T – швидкість теплового руху електронів; N_0 – кількість атомів в одиниці об'єму; d – період кристалічної гратки.

Під впливом механічних напружень о змінюється період гратки. Показано [15], що в пружній області деформацій має місце залежність:

$$\Delta \chi = K_{\chi} \cdot \Delta \sigma \,, \tag{4}$$

де K_{χ} – коефіцієнт, залежний від властивостей матеріалу.

При цьому відомо [16], що за впливу пружніх напружень значення χ змінюється на 1...2 %.

Суттєвіші зміни χ викликають пружно-пластичні деформації: що вищий рівень пластичної деформації, то більша електропровідність алюмінієвих сплавів типу 2024 і 7075 [16]. Встановлено [16], що електропровідність попередньо деформованих сплавів цього типу після відпалу зростає на 40%. При цьому зростає поздовжня (longitudinal) складова електропровідності, а поперечна (transverse) складова, навпаки, падає, що зумовлює малу чутливість під час вимірювань електропровідності циліндричними вихрострумовими давачами [16].

Тут треба відзначити, що значне зростання значення χ після відпалу може бути зумовлено не стільки зниженням механічних напружень, як структурним фактором. Дійсно, під впливом зовнішніх циклічних напружень електропровідність аустенітної сталі 304 до моменту появи тріщин знизилась лише на 4 % [17], а алюмінієвого сплаву 2024 практично не змінилася. При цьому за статичного розтягу зразка цього сплава в пружній області значення χ не змінюється, а з переходом в пружно-пластичну область до руйнування знизилося на 1,7 % [18].

Складна і часто неоднозначна залежність електропровідності алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 зафіксована [13, 19-21] залежно від їх хімічного складу і структурно-фазового стану після термічної обробки. У вихідному стані (постачання) структурно-фазовий склад цих сплавів представляє собою зерна твердого розчину на основі алюмінію та включення вторинної фази, які за розміром можна розділити на три групи [22]: великі (1...100 мкм) нерозчинні включення типу (Cu, Fe, Mn)Al $(Cu, Fe, Mn)_3Si_2Al_{15}, Al_7Cu_7Fe, FeAl_6, Mg_2Si,$ які утворюються під час виплавляння за участі домішок Fe i Si; середні (0,05...0,5мкм) інтерметаліди типу Al₁₂Mn₂Cr, які виділяються під час гомогенізації виливка; дисперсні (0,01...0,1. мкм) інтерметаліди типу Al,Cu, Al₂CuMg, Zn₃Mg₄Al₃, MgZn₂ - так звані зони Гіньє-Престона (G.-Р.), які зароджуються під час старіння гартованих сплавів і відіграють основну роль у їх зміцненні. Електропровідність χ таких сплавів залежить від здатності розсіювати потік вільних електронів елементами мікроструктури. Після гартування, коли утворюється пересичений твердий розчин, за більшого впливу Cr, Mn, Fe, Ti, Si і меншого впливу Zn, Mg, Cu спостерігають зменшення значення χ порівняно з вихідним станом. Оскільки розчинені елементи, їх сегрегації (виділення), дислокації є основними факторами, які створюють локальні пружнопластичні поля і відповідно зумовлюють розсіювання електронів, це призводить до зростання електроопору сплавів (падіння χ).

Природне старіння. Після витримки на повітрі (вилежування) електропровідність загартованих сплавів зменшується на 10...15 % за зростання міцності і твердості у 1,5...2 рази [13, 23]. Це зумовлено зростанням кількості і розмірів зон G.-P., які ефективно розсіюють електрони. Хоча при цьому дифузія атомів Zn, Mg і Cu з твердого розчину для формування цих зон очищає матрицю, що зумовлює ріст χ , але тут переважає вплив зон G.-P.

Штучне старіння. Після витримки загартованих сплавів за підвищених (100...200 °С) температур їх електропровідність підвищується з ростом температури і часу витримки за рахунок інтенсивного виходу легувальних елементів з твердого розчину. При цьому, як правило, зростає міцність і твердість сплавів після деформаційного зміцнення матриці когерентними і напівкогерентними зонами G. – Р. [13, 23–25].

Перестарювання. За підвищення температури (> 200 °C) і часу витримки (більше 8–10 год.) зони G.-P. ростуть, відбувається зрив когерентності з матрицею, виділення вторинної фази укрупнюються, внутрішні напруження падають. Внаслідок цього помітно зростає електропровідність χ , оскільки зменшується розсіювання електронів в кристалічній гратці матриці, і знижується твердість і міцність сплавів [13, 20, 23, 24, 26–28]. При цьому необхідно відзначити, що при перестарюванні зниження міцності і ріст електропровідності може супроводжуватись не підвищенням, а зниженням пластичності, що пов'язано з виділенням вторинної фази вздовж меж зерен [23, 26].

RRA-обробка. Ця обробка (retrogression and re-aging) полягає у витримці сплавів після штучного старіння в соляній ванні до 45 хв при 200 °C і повторному штучному старінні, що зумовлює зміну морфології і властивостей вторинних фаз та забезпечує підвищення ударної в'язкості і опору корозійно-механічному руйнуванню під напруженням (stress corrosion cracking – SCC). Порівняно з традиційно зістареними сплавами типу В95 (7075 і 7079) після RRA-обробки міцність падає, а електропровідність зростає [29, 30].

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

Повторний нагрів (перегрів). Нагрів термічно зміцнених алюмінієвих сплавів вище певних температур під час експлуатації чи механічної обробки призводить до розпаду твердого розчину, коагуляції і розчинення вторинних фаз, росту величини зерна тощо, що зумовлює суттєве зниження міцності і помітний ріст електропровідності цих сплавів [13, 24, 31].

Таким чином, аналіз літературних даних показує, що для термооброблених алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 у вихідному стані (поставки) для більшості випадків існує кореляційний зв'язок (рис. 2, заштриховані області): зниження міцності та підвищення пластичності супроводжується ростом електропровідності цих сплавів.

Структуроскопія старіючих літаків. Після деградації сплавів типу Д16 і В95 в лабораторних умовах, яка моделює вплив термосилових експлуатаційних факторів [7, 32, 33], а також після їх довготривалої експлуатації (експлуатаційна деградація) [34] отримано дані про фізико-механічні властивості цих сплавів, які якісно протилежні до відомих літературних даних для термооброблених сплавів цього типу (рис.2, символи). Після деградації характеристики міцності сплавів змінюються мало, проте суттєво падає відносне видовження. Це супроводжується ростом питомої електропровідності χ, а не її зниженням, як це слідує на підставі даних для термооброблених сплавів (рис. 2, заштриховані області). Під час тривалої експлуатації структура сплавів сформована під впливом не тільки температурного фактору, але й механічних напружень. Це зумовлює [32, 34] збільшення кількості дисперсних інтерметалідів (рис.3, а), мікророзтріскування дрібних включень вторинної фази (рис. 3, δ), зміну густини дислокацій і локального деформованого стану матриці (рис.3, в, г і 3, д, е відповідно), декогезію вдовж міжфазних меж інтерметалід-матриця і розтріскування крупних включень вторинної фази (рис.3, ж-и). Порівняння результатів досліджень зразків, вирізаних з обшивок крила в околі нервюри № 14, де діяли мінімальні робочі напруження (рис.3, в, д), а також в околі нервюри № 2, де діяли максимальні робочі напруження (рис.3, r, e, \mathcal{H}), переконливо показує негативну роль механічного фактора. Ці дані, очевидно, пояснюють вищезазначене протиріччя у зміні електропровідності



Рис. 2. Залежності границі міцності σ_в, відносного видовження δ і питомої електропровідності алюмінієвих сплавів типу Д16 (*a*, *в*) і В95(*б*, *г*): заштриховані області – літературні дані [13, 19, 21] для термооброблених сплавів; експериментальні дані [7, 32, 34] для сплавів у вихідному стані (символи *I*), після модельної (2) та експлуатаційної деградації в зоні нервюр №14 (*3*), №12 (*4*), №4 (*5*) і №2 (*6*) нижньої і верхньої обшивок крила літака АН-12 (див. рис. 5)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



*Рис. 3.*Тонка структура (*a*-*ж*) і мікрофрактограми (з, *u*) сплавів типу В95 (*a*, *b*, *c*, *ж*-*u*) і Д16 (*б*, *d*, *e*) після модельної (*a*, *б*, *u*) і експлуатаційної деградації в зоні нервюр № 14 (*b*, *d*) і № 2 (*c*, *e*-3); *з* – випроба на повітрі, *u* – випроба в 3,5 % розчині NaCl

і механічних властивостей для деградованих і термооброблених сплавів типу Д16 і В95.

На специфічну поведінку деградованих алюмінієвих сплавів вказує також наступний факт. Встановлено [27, 30], що схильність до корозійного розтріскування (SCC) термозміцнених алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 менша, коли їх електропровідність вища. Після тривалої експлуатації електропровідність х деградованих сплавів цього типу зростає (рис.2), але їх втомна довговічність в корозивному середовищі суттєво знижується [11], інтенсифікується крихкий міжзеренний мікромеханізм їх руйнування (рис.3, и). Таким чином, сумісна тривала дія механічних напружень і підвищених температур обумовлює особливу структуру, значні локальні внутрішні напруження і визначає особливу механічну поведінку конструкційних алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 [34]. При цьому (рис. 4) зростає їх схильність до крихкого руйнування (падає пластичність δ) і знижуються характеристики циклічної тріщиностійкості ($\Delta K_{th}, \Delta K_{fc}$), які визначають втомну довговічність Й, елементів конструкцій [10], а питома електропровідність х зростає, що узгоджується з наведеною вище залежністю (4). Встановлено [7, 11, 32, 34], що падінню порогу втоми ΔK_{th} і втомної довговічності N_f зразків деградованих сплавів типу Д16 і В95 у 1,5...2 рази відповідає ріст питомої електропровідності χ на 20...30 % (3...4 МСм/м при точності вимірювання 0,1 МСм/м), що дає основу для моніторингу деградації конструкційних алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації неруйнівним методом [35].

Показано [34], що деградаційні процеси залежать від навантаженості зон елементів конструкцій і відображаються у зміні значення електропровідності χ (рис.5). Це вказує на можливість визначення критичних зон в обшивці планера літака під час експлуатації чи стендових випробувань на підставі замірів питомої електропровідності матеріалу.

Засоби структуроскопії неферомагнітних матеріалів. Відомі методики і засоби вихрострумової структуроскопії застосовували переважно для контролю якості термообробки і змін структури неферомагнітних матеріалів під час їх виробництва [13]. Для моніторингу експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів під час довготривалої експлуатації літаків розроблено нові вихро-





Рис. 4. Залежності відносного видовження (*a*), порога втоми (б) і питомої електропровідності (*в*) деградованих сплавів Д16АТНВ (*1*) і В95Т1 (*2*) від усереднених локальних внутрішніх напружень, визначених через густину дислокацій [34]



Рис. 5. Залежності питомої електропровідності χ сплавів Д16АТНВ (*1*) і В95Т1 (*2*) від експлуатаційних напружень $\sigma_{\text{екв}}$ в околі різних нервюр для нижньої і верхньої обшивок крила [34]

струмові вимірювачі питомої електропровідності типу ВЕП-21 і ВЕП-22 (рис. 6, *a*), оскільки вимірювання безпосередньо на обшивках літаків потрібно проводити через шар захисного лакофар-



Рис. 6. Вихрострумовий вимірювач електропровідності ВЕП-22 (*a*) і залежність напруги $U_{\phi \beta}$ на виході його фазового детектора від зазору t_3 без відстроювання (*l*) і з відстроюванням (*2*) від зазору (δ)

бового покриття, а також в критичних зонах біля заклепкових отворів тощо. Тому принциповою вимогою до цих приладів є висока локальність (роздільна здатність) контролю і невелика похибка при змінах товщини діелектричного покриття (або повітряного проміжку між давачем і контрольованою металевою поверхнею).

Під час розробки вихрострумових структуроскопів ВЕП-21 і ВЕП-22 використано ряд технічних рішень на основі фазового способу обробки сигналу вихрострумового перетворювача (ВСП), які дозволили забезпечити високу точність вимірювання і зменшити додаткову похибку від зміни зазору між ВСП і поверхнею об'єкта контролю [36-39]. Прилади забезпечені локальними компенсованими ВСП, генераторна, вимірювальна і компенсаційна обмотки яких встановлені на феритових осердях діаметром 1,2 і 0,7 мм. Встановлена залежність напруги на виході фазового детектора приладу $U_{\rm dyl}$ від величини зазору t_3 за різних режимів настроювання приладу показує (рис. 6, б), що використання нових рішень дозволило повністю заглушити вплив зміни зазору до 0,5 мм, тобто можна проводити контроль змін структури матеріалу обшивок літаків без зняття захисного покриття.

Метрологічне забезпечення цих структуроскопів здійснюється за допомогою комплекту еталонів (18 атестованих зразків), які відтворюють ПЕП алюмінієвих сплавів в діапазоні від 14,0 до 37,1 МСм/м [40].

Висновки

На підставі замірів питомої електропровідності матеріалів вихрострумовим методом можна:

 виявляти критичні зони планера літака (зокрема, обшивки фюзеляжа і крил) після тривалої експлуатації;

 проводити моніторинг деградації конструкційних матеріалів під час тривалої експлуатації;

 визначати поправочні коефіцієнти при розрахунку залишкового ресурсу авіаконструкцій з урахуванням експлуатаційної деградації матеріалів.

Необхідно створювати нову базу даних про кореляційні залежності механічних і фізичних характеристик конструкційних алюмінієвих сплавів після тривалої експлуатації, оскільки наявні довідникові дані, отримані для термооброблених сплавів у вихідному стані (постачання), для цього непридатні.

Вирішення вище перерахованих задач забезпечують методики і засоби вихрострумового неруйнівного контролю, розроблені у Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка НАН України.

- Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Т.9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін. / Під ред. О.П. Осташа, В.М. Федірка. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 1068 с.
- Vapor phase inhibitors to extend the life of aging aircraft / B. Bavarian, L. Reiner, H. Yuossefpour, J. Juraga // Corrosion. – 2005, Paper 05329. – P. 1–9.
- Schijve J. Fatigue damage in aircraft structures, not wonted, but tolerated? // Int. J. Fatigue. – 2009. – 31. – P. 998–1011.
- Учанин В. Н., Дереча В. Я. Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 4. – С. 20–28.
- Учанін В.М., Осташ О.П., Дереча В.Я. Роль неруйнівного контролю при реалізації сучасних концепцій безпечної експлуатації авіаційної техніки // Праці 6-ої нац. наукю-техн. конф. "Неруйнівний контроль і технічна діагностика" (UkrNDT-2009). Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2009. С. 42–47.
- Sheuring J. N., Grandt (Jr) A.F. Mechanical properties of aircraft materials subjected to long periods of service usage // Transactions ASME. – 1997. – 119, October. – P. 380–386.
- Осташ О.П., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В. Деградація матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2006. №4. С. 5–16.
- Влияние длительной эксплуатации самолетов на свойства материалов их конструкций / Г.И. Нестеренко, В.Н. Басов, Б.Г. Нестеренко, В.Г. Петрусенко// Проблемы машиностроения и надежность машин. – 2006. – №4. – С. 41–50.
- Nesterenko G. I., Nesterenko B. G. Ensuring structural damage tolerance of Russian aircraft // Int. J. Fatigue. 2009. 31. – P. 1054–1061.
- Осташ О.П. Нові підходи в механіці втомного руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – №1. – С. 13–25.
- Вплив корозивного середовища на втомну довговічність деградованих алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 / О.П.

Осташ, І.М. Андрейко, Ю.В. Головатюк, О.І. Семенець // Там само. – 2008. – № 5. – С. 75–84.

- Смирнов А. А. Теория электросопротивления сплавов. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. –148 с.
- Дорофеев А. Л., Ершов Р. Е. Физические основы электромагнитной структуроскопии. – Новосибирск: Наука, 1985. –183 с.
- Берестецкий В. Б., Лившиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. – Теоретическая физика в 10 т. – Т.4. – М.: Наука, 1989. – С. 421–422.
- 15. Пат. на изобретение 2327124 С2 РФ. Неразрушающий способ определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов / С.Ю. Иванов, Д.В. Васильков, А.Б. Гутнер и др. Опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17.
- Morozov M., Tian G. Y., Withers Ph. J. Noncontact evaluation of the dependency of electrical conductivity on stress for various Al alloys as a function of plastic deformation and annealing // J. Appl. Physics. 2010. –108, Paper 024909. P. 1–9.
- 17. Пат. № 0083032 А1США. Self-monitoring metals, alloys and materials / Neil J. Goldfine. Опубл. 21.04.2005.
- Rajic N., Burke S. K. and Galea S. C. An experimental study of the relationship between electrical conductivity and early fatigue damage in Al 2024 // Technical Note (DS-TO-TN-0387) of Aeronautical and Maritime Research Laboratory. – 2001. – P. 1–11.
- Наумов Н. М., Микляев П. Г. Резистомерический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
- Hagemaier D. J. Applications of eddy current testing to airframes // Nondestructive Testing Handbook (Second Edition), Vol.4, Section 14. – American Society for Nondestructive Testing, 1986. – P. 369–421.
- Неразрушающий контроль. Справ. в 7 т. / Под. общ. ред. В.В. Клюєва. Т.2, кн. 2: Вихретоковый контроль / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровський, Ю.Я. Останин. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 340–687.
- Фриндляндер И. Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
- Correlation of strength with hardness and electrical conductivity for aluminum alloy 7010 / M.A. Salazar, Y.Y. Zhao, A. Pitman, A. Greene // Materials Science Forum. 2006. 519–521. P. 853–858.
- 24. *Rummel W. D.* Characterization and evaluation of 2014 aluminum alloy by eddy current conductivity techniques // Materials Evaluation. 1966. **XIV**, № 6. P. 322–326.
- Gür C. H., Yildiz I. Utilization of nondestructive methods for determining of effect of age-hardening on impact toughness of 2024 Al-Cu-Mg alloy // J. Nondestruct. Evaluation. - 2008. - 27. - P. 99-104.
- Microstructural evolution of aluminum alloy 7B04 thick plate by various thermal treatments / Zh. Li, B. Xiong, Y. Zhang et al. // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2008. – 18. – P. 40–45.
- Tsai T. C., Chuang T. H. Relationship between electrical conductivity and stress corrosion cracking susceptibility of Al 7075 and Al7475 alloys // Corrosion. – 1996. – 52, №6. – P. 414–416.
- Starink M. J., Li X. M. A model for the electrical conductivity of peak-aged and overaged Al-Zn-Mg-Cu alloys // Metallurgical and Materials Transactions, Ser. A. – 2003. – 34A, April. – P. 899–907.
- Retrogression and re-aging treatment of Al-9,99Zn-1,72Cu-2,5Mg-0,13Zr aluminum alloy / C. Feng, Zh. Liu, A. Ning et al. // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2006. 16. P. 1163–1170.
- Zaid H. R., Hatab A. M., Ibrahim A. M. A. Properties enhacement of Al-Zn-Mg-Cu alloy by retrogression and re-aging heat treatment // J. Mining and Metallurgy, Sect. B-Metall. 2011. 47, № 1, P. 31– 35.
- Hagemaier D. J. Evaluation of heat damage to aluminum aircraft structures // Materials Evaluation. –1982. – 40, №9. – P. 962–969.
- Структурно-фазовий стан і фізико-механічні властивості деградованих алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 /

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

О.П. Осташ, І.М. Андрейко, Ю.В. Головатюк, Л.Б. Ковальчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 6. – С. 5–11.

- Пат. 69091 Україна. Спосіб моделювання деградації конструкційних матеріалів в об'єктах тривалої експлуатації / О.П. Осташ, В.М. Учанін, І.М. Андрейко, Ю.В. Головатюк. – Опубл. 25.04.2012, Бюл. №8.
- 34. Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 / О.П. Осташ, І.М. Андрейко, Л.І. Маркашова та ін. // Фіз.хім. механіка матеріалів. – 2013. – № 1. – С. 18–27.
- 35. Пат. 101424 Україна. Вихрострумовий спосіб визначення ступеня експлуатаційної деградації конструкційних матеріалів / О.П. Осташ, В.М. Учанін, І.М. Андрейко, Ю.В. Головатюк. – Опубл. 25.03.13, Бюл. № 6.
- Пат. 98206 Україна. Спосіб вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів / В.М. Учанін. – Опубл. 25.04.2012, Бюл. № 28.
- Пат. 97304 Україна. Вихрострумовий вимірювач питомої електропровідності неферомагнітних матеріалів / В.М. Учанін, Г.М. Макаров, В.В. Черленевський. – Опубл. 10.01.2012, Бюл. 2.
- Пат. 58670 Україна. Пристрій вихрострумового контролю параметрів виробів / В.М. Учанін, В.В. Черленевський. – Опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.
- Пат. 55509 Україна. Спосіб настроювання приладів вихрострумового контролю / В.М. Учанін, В.В. Черленевський. – Опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
- Наумов Н. М. Микляев П. Г. Стандартные образцы для измерения удельной электрической проводимости // Дефектоскопия. – 1979. – № 8. – С. 33–37.

The need to take into account the degradation of structural materials at evaluation of residual life of aircraft structure elements after long-term service is substantiated. Results of investigations of degradation of properties of aluminium alloys of D16 and V95 type in wing sheath of AN-12 plane after 40 years of service are given. Degradation is manifested, primarily, in lowering of their ductility (relative elongation δ) and cyclic crack resistance characteristics (fatigue limit ΔK_{th} and cyclic fracture toughness ΔK_{tc}). It is shown that lowering of mechanical characteristics of these alloys is related to change of specific electric conductivity of degraded alloys allows performance of reliable monitoring of this process. Instruments for eddy current non-destructive monitoring of structure degradation and mechanical characteristics of structural aluminium alloys after long-term service is stated, as the available data derived for heat-treated alloys in as-delivered condition, are unfit for this purpose.

K e y w o r d s : aircraft structure element, long-term service, material degradation, structure, mechanical properties, structuroscopy, eddy current method

Надійшла до редакції 03.04.2013

Двадцать первая ежегодная международная конференция и выставка

«Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» 30 сентября – 4 октября 2013, Ялта

Организаторы

УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», Украинское общество НК и ТД, Российское общество НК и ТД, Белорусская ассоциация НК и ТД, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Днепропетровский нац. ун-т, НПП «Машиностроение»

Тематика конференции и выставки

•Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) •Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов •ТД и мониторинг состояния производственных объектов • Контроль напряженного состояния конструкций, изделий и сварных соединений • Опыт и перспективы НК на предприятиях горно-металлургического комплекса • НК и ТД в нефтегазовой отрасли и энергетике • Контроль и диагностика строительных конструкций • Вибрационные методы диагностики•Вопросы обучения, аттестации и сертификации специалистов, подразделений НК и ТД • Разработка и гармонизация стандартов в области НК и ТД • Метрологическое обеспечение средств НК • Состояние и развитие НК и ТД в Украине • Заседание Правления УО НКТД

В работе выставки предполагается участие представителей фирм: НПП «Машиностроение», НПФ «Ультракон», НПФ «Диагностические приборы», НПП «ИНТРОН-СЭТ», НПФ «Ультракон-сервис», МЧТПП "«Онико»", Фирмы «GE Inspection Technologies», SEIFERT», «Krautkramer», «Интек», НПП «КонТест», ППЦ «Диагностика и контроль», «Кром», «Шерл», «Сперанца–Украина», ЗАО НИИ МНПО «Спектр», ЗАО «Константа», Микроакустика, Панатест (Россия), АО «VOTUM»-AO «Интроскоп»(Молдова) и др.

Информационная поддержка

Журналы: «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Сварцик», «В мире неразрушающего контроля», сборник ВАК Украины «Системные технологии», бюллетень УО НКТД «НК-Информ», Сайт УО НКТД: www.usndt.com.ua, сайт НПП «Машиностроение»: www.ndt.in.ua Оргкомитет 02094, г.Киев, ул.Минина,3, к.47 тел./факс: (+38 044) 5733040 e-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua

ОЦЕНКА РАБОТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ИГК-90.1 И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ

К.Ф. БОРЯК, М.А. МАНЗАРУК

Одесская гос. акад. технического регулирования и качества. 65020, г. Одесса, ул.Кузнечная, 15. E-mail: odivt@mail.ru; ndi pssem@mail.ru

Анализируются полученные эмпирическим путем графические зависимости между параметром сопротивления и скоростью перемещения поршня для различных четырех типов гидравлических гасителей колебаний, которые сегодня устанавливаются на локомотивах Одесской железной дороги. Поскольку параметр сопротивления для гидравлического гасителя является определяющим для оценивания его технической исправности, полученные эмпирическим путем значения (графические зависимости) параметра сопротивления от скорости вполне могут служить критерием при диагностировании технического состояния гасителей. Для этого надо установить численные значения (границы) доверительного интервала погрешности измерений параметра сопротивления и форму кривой для разных режимов работы (растяжения и сжатия), соответствующую технически исправному гидравлическому гасителю. Такая возможность проведения технической диагностики гидравлических гасителей колебаний появилась благодаря новой конструкции испытательного стенда марки ИГК-90.1. Приводятся первые положительные результаты работы испытательного стенда марки ИГК-90.1, конструкция которого выполнена на основе предложенного авторами нового подхода к получению демпфирующей характеристики (параметра сопротивления) испытуемого гидравлического гасителя колебаний.

Ключевые слова: гидравлический гаситель, испытательный стенд, параметр сопротивления

На Одесской железной дороге эксплуатируются электровозы серии ВЛ80т/с, ВЛ40у, 2ЭЛ5, 2ЭС5К, тепловозы серии ЧМЭЗ, на которых установлены четыре основных типа гидравлических гасителей колебаний: КВЗ 45.30.045, ТЕ 1-10А, 677.000-01 и 678.000. Общее количество установленных на тяговом подвижном составе Одесской железной дороги гидравлических гасителей колебаний составляет 7742 шт., причем наибольшее количество их приходится на электровозы серии ВЛ80 и тепловозы серии ЧМЭЗ. Проблема с эксплуатацией гасителей колебаний всегда остро стояла на Одесской железной дороге. Более серьезную актуальность проблема приобрела в последние годы, когда тепловозы серии ЧМЭЗ начали массово эксплуатироваться в качестве «диспетчерских» на полигонах плеч обслуживания. Недостаточная оснащенность технологическим оборудованием ремонтной базы в депо для проведения ремонта гидравлических гасителей колебаний, а главное, отсутствие возможности проводить на должном уровне их испытание, привело к ситуации, когда на один тепловоз ЧМЭЗ приходилось в среднем лишь 50 % исправных гасителей колебаний. В результате из-за наличия вертикального галопирования кузова тепловоза их эксплуатация со скоростями более 50 км/ч (при конструктивной 95 км/ч) стала невозможной, а это влечет за собой снижение участковых скоростей движения поездов и, как следствие, уменьшение общей пропускной способности железной дороги.

Учитывая то обстоятельство, что на приобретаемых сегодня Укрзализныцей новых электровозах марки 2ЭЛ5 та 2ЭС5К количество гасителей колебаний в 2,5 раза увеличено в сравнении с электровозами ВЛ80, возникает острая необходимость в организации в локомотивных депо отдельной позиции для проведения диагностики технического состояния гасителей колебаний, как того требует ведомственный технический регламент [1]. Неотъемлемой частью технического освидетельствования гасителей колебаний является процедура их испытания на специальных стендах. С этой целью локомотивными депо Котовск и Знаменка были приобретены современные испытательные стенды марки ИГК-90.1 отечественного производства (рис. 1).

В конструкцию испытательного стенда марки «ИГК-90.1» авторами заложен новый подход к получению демпфирующей характеристики (параметра сопротивления) для испытуемого гидравлического гасителя колебаний. Суть нового подхода подробно изложена в работе авторов [2] и заключается в допущении того, что функция параметра сопротивления β гасителя колебаний не зависит от вида закона механического нагружения гасителя *F* и может быть получена эмпирическим путем как зависимость между силой сопротивления *P* и скоростью перемещения поршня v, если испытания проводятся в достаточно широком диапазоне. Допущения авторов базируются на том основании, что вязкая несжимаемая жидкость имеет ин-

© К.Ф. Боряк, М.А. Манзарук, 2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 1. Стенд ИГК-90.1, установленный в локомотивном депо Котовск Одесской железной дороги

финитезимальную (бесконечно короткую) память. Бесконечно короткая память - не просто одно из главных свойств вязкой несжимаемой жидкости - это ее определяющее свойство. Жидкость реагирует только на деформации, которым она подвергается в рассматриваемый момент времени и полностью забывает те деформации, которым она подвергалась любое конечное время тому назад, сколь бы недавно это ни происходило. Таким образом, можно допустить, что гидравлическая компонента гасителя колебаний является безынерционной и практически мгновенно реагирует на изменение воздействий дорожного полотна. Запаздывание может обусловливаться лишь сжимаемостью присутствующего в цилиндре гасителя колебаний воздуха и объективной инерционностью срабатывания его механических элементов (клапанов). Это подтверждается как практикой эксплуатации спортивных автомобилей, так и положениями о жидкостях [3].

Стенд имеет ряд существенных отличий от аналогичного оборудования других известных производителей. В конструкции стенда используется пневматический привод (встроенный компрессор) малой электрической мощности 2,2 кВт, который обеспечивает механическое возвратно-поступательное перемещение штока гасителя при испытаниях по синусоидальному закону. В случае использования для пневмопривода стенда магистрали воздуха, имеющейся в депо, потребление электроэнергии стендом можно снизить до 0,7 кВт. Известные аналоги гидроприводных стендов имеют мощность 22 кВт. Это позволяет отнести стенд ИГК-90.1 к классу энергосберегающего технологического оборудования, что отвечает принятой Кабинетом министров Украины концепции «Энергетической стратегии Украины до 2030 г.».

Вторым преимуществом является экологическая чистота пневмопривода и рабочего места, на котором отсутствует загрязнение маслом от гидропривода и его соединений в конструкции, что тоже немаловажно для условий эксплуатации стенда в ремонтных депо. В приводном механизме для перемещения поршня гасителя отсутствует промежуточный кривошипно-шатунный узел, что упрощает передачу нагрузки от привода к испытуемому гасителю колебаний и позволяет проводить испытания гасителя во всем рабочем диапазоне перемещения поршня (0...240 мм). Конструкция стенда выполнена таким образом, что в ходе испытаний позволяет определить для каждого конкретного испытуемого гасителя его «реальный» максимальный ход поршня. В ходе ремонта длина рабочего хода поршня гасителя может уменьшаться из-за возникающих дефектов приварки штока к крышке защитного кожуха либо из-за изгибных деформаций при установке. Выявить такие дефекты штока гасителя можно только путем испытания по максимальному рабочему ходу поршня. Это очень важно, поскольку только на максимальных ходах поршня при испытаниях можно выявить наличие или отсутствие воздуха в цилиндре гасителя и определить уровень демпфирующей жидкости (масла) в цилиндре, от которого зависит нормальная работа гасителя в целом. Например, в ходе эксплуатации было установлено, что гаситель типа КВЗ 45.30.045 становится неработоспособным вследствие попадания в рабочий цилиндр воздуха даже при небольшой потере жидкости (≈10 %).

Фиксированный объем жидкости является одним из самых главных составных элементов любого гидравлического гасителя колебаний, обеспечивающего демпфирование по его назначению. Назначение гидравлического гасителя колебаний как поглотителя механической энергии определяется свойствами вязкой несжимаемой жидкости. Принцип работы гидравлических гасителей колебаний (рис. 2) заключается в последовательном перемещении вязкой жидкости из одной полости цилиндра в другую через специальные дроссельные отверстия в поршневой системе под внешним воздействием растягивающих или сжимающих сил [4].

К сожалению, в действующем ведомственном нормативном документе [1] отсутствуют четкие рекомендации относительно критериев выбора испытательного оборудования для гидравлических гасителей колебаний и предъявляемых к ним технических требований, что порождает разные подходы к проведению самих испытаний. Отсутствие единства приводит к тому, что эксплуатационные транспортные предприятия и производители гидравлических гасителей колебаний проводят свои испытания на различных испытательных стендах, которые отличаются не только по конструкции, но и по принципу работы. Например, известный всем российский производитель ОАО «Петуховский литейно-механический завод», который производит гасители колебаний (демпферы) типа КВЗ 45.30.045М, проводит проверку механических характеристик своих гасителей (с максимальным ходом поршня по



Рис. 2. Конструктивная схема гидравлического гасителя колебаний: 1 – шток; 2 – направляющая втулка; 3 – корпус; 4 – рабочий цилиндр; 5 – резервуар; 6 – поршень; 7 – верхний клапан; 8 – нижний клапан

паспорту 195 мм) на перемещении поршня всего в 50 мм (рис. 3).

Если принять на веру, что контроль качества на этом предприятии осуществляется одинаково хорошо на всех промежуточных этапах производства гасителя колебаний, то еще можно принять такие условия испытаний для новых изделий. Но вот для побывавших в эксплуатации гасителей колебаний проводить испытания уже точно необходимо на максимальном рабочем ходе поршня. К сожалению, во многих эксплуатационных транспортных депо не придают этому должного значения и проводят испытания гасителей на фиксированной и существенно ограниченной длине перемещения поршня (например, для гасителей типа КВЗ 45.30.045 на ходе до 100 мм). Причина этого явления очевидна - отсутствие в нормативном документе единства требований, предъявляемых к самой методике проведения испытаний и к



Рис. 3. Фрагмент протокола испытаний гасителя колебаний типа КВЗ 45.30.045М на стенде «ЭНГА» типа СИЛ-02-01

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

техническим возможностям испытательного оборудования. Это еще одна проблема, которая требует скорейшего разрешения, но она выходит за рамки настоящей статьи.

Стенд оснащен встроенной системой самотестирования, что позволяет контролировать рабочее состояние исполнительных узлов в конструкции стенда и их соответствие паспортным техническим характеристикам перед началом проведения испытаний. Процесс проведения испытаний полностью автоматизирован и визуализируется на экране монитора в режиме реального времени (рис. 4).

Визуализация на экране монитора информации о результатах проведенных испытаний формируется в виде графических зависимостей между силой сопротивления Р, параметром сопротивления β и скоростью перемещения поршня v (рис. 5). Для проведения анализа и принятия решения о техническом состоянии гасителя колебаний протокол с результатами испытаний распечатывается на бумаге, а также можно записать на портативный «флеш-носитель».

Гидравлические гасители колебаний не воспринимают статические нагрузки, а только развивают силы сопротивления во время относительных перемещений кузова, рамы тележки и буксы [4]. Сила сопротивления гидравлических гасителей колебаний пропорциональна скорости перемещения поршня:

$$P = \beta v, \tag{1}$$

где *P* – сила сопротивления, кH; *v* – скорость перемещения поршня, м/с; β – параметр сопротивления (коэффициент сопротивления), кH·с/м.

Параметр сопротивления β зависит от вязкости рабочей жидкости гасителя, площади сечения дроссельных отверстий клапанов, через которые проходит жидкость, и диаметра рабочей поверхности поршня. Оптимальное значение в рекомендуется определять по формуле:



Рис. 4. Диаграммы испытаний гасителя колебаний на стенде ИГК-90.1 в режиме реального времени: 1...13 – чувствительные сенсорные элементы на экране монитора для интерактивного управления процессом испытаний оператором в «ручном» режиме

人 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Puc. 5. Вид на экране монитора получаемых при испытаниях графических зависимостей между силой сопротивления *P* и скоростью перемещения поршня v: *1* – сенсорная клавиша для вывода графической информации; *2* – график изменения величины силы, прикладываемой к гасителю; *3* – график изменения параметра сопротивления

$$\beta = k\beta_{\rm \kappa p,} \tag{2}$$

где k – поправочный коэффициент (при $k \le 0,2$ – доля критического сопротивления, при котором колебания гасителя близки к гармоническим); $\beta_{\rm кp}$ – критическое значение параметра сопротивления, при котором колебания гасителя отсутствуют.

Заметим, что для сил сопротивления гидравлических гасителей существуют также и более общие модели вида [5]:

$$\beta v |v|^{n-1}, n \geq 1$$

причем от их выбора существенно зависит достоверность расчета подвески.

Нами был проведен анализ полученных при испытаниях графических зависимостей между силой сопротивления P и скоростью перемещения поршня v, и между параметром сопротивления β и скоростью перемещения поршня v для четырех типов разных гасителей колебаний (рис.6, 7).



Puc. 6. Полученные при испытаниях графические зависимости между силой сопротивления *P* и скоростью перемещения поршня ν, и между параметром сопротивления β и скоростью перемещения поршня ν для разных типов гасителей колебаний: *a* – KB3 45.30.045; *б* – TE 1-10A



Puc. 7. Полученные при испытаниях графические зависимости между силой сопротивления *P* и скоростью перемещения поршня *ν*, и между параметром сопротивления β и скоростью перемещения поршня *ν* для разных типов гасителей колебаний: *a* – 677.000-01; *б* – 678.000

Было установлено, что указанная в соотношении (1) зависимость силы сопротивления Р от скорости v разная для каждого из типов гасителей. Так, в режиме «сжатия» в диапазоне значений скоростей 50...250 м/с, а также в режиме «растяжения» в диапазоне 100...300 м/с для исправных гасителей колебаний типа КВЗ 45.30.045 графическая зависимость (рис. 6, а) имеет явно выраженный линейный характер, при этом значение силы сопротивления в указанном диапазоне практически не изменяется от скорости. Это может служить в дальнейшем как показатель технически исправного гасителя колебаний. То же можно сказать в режиме растяжения (рис. 6, δ) и для гасителя типа ТЕ 1-10А. Однако для пограничных значений скоростей в диапазоне 250...300 м/с в режиме «сжатия» и в диапазоне 50...100 м/с в режиме «растяжения» имеет место явно выраженная нелинейность функциональной зависимости.

Для двух других типов гасителей 677.000-01 и 678.000 можно также констатировать сохранение характера линейности и нелинейности в указанных диапазонах и режимах (см. рис.7).

Но в отличие от двух предыдущих типов КВЗ 45.30.045 и ТЕ 1-10А, значение силы сопротивления в указанных диапазонах не постоянна, несмотря на то, что техническое состояние гасителей 677.000-01 и 678.000 полностью удовлетворяет требованиям нормативного документа [1]. Если на этом показателе качества оценивать работу всех четырех типов гасителей колебаний, то в наиболее выигрышном положении окажутся типы KB3 45.30.045 и TE 1-10A, которые обеспечивают постоянство значения силы сопротивления в достаточно широком диапазоне скоростей по сравнению с типами 677.000-01 и 678.000. Если графическая зависимость P от v более пологая, чем шире сам диапазон, тем комфортнее будет поездка для пассажиров и машиниста на транспортном средстве. Но это выходит за рамки обзора результатов работы испытательного оборудования и принятой методике проведения испытаний.

Распространение механических воздействий в вязкой несжимаемой жидкости происходит практически мгновенно (со скоростью звука) и с этой точки зрения можно провести аналогию со свойствами твердого тела. Для предотвращения деформации конструкции гасителя колебаний от воздействия на них ударных нагрузок в поршневую систему встраивают предохранительные клапаны для экстренного перепускания жидкости. Точки, в которых наблюдается резкое изменение графической зависимости P от v (характерно для типов 677.000-01 и 678.000) соответствуют моменту срабатывания клапанов, т.е моменту перехода из дроссельного режима работы гасителя в клапанный (см. рис.7). Это может служить информацией для определения момента срабатывания клапанов и в дальнейшем использоваться в регулировочных работах при ремонте гасителей.

В своей технической документации производители гасителей колебаний указывают толь-

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

ко значения силы сопротивления P, привязанные к конкретной скорости, и не указывают значение параметра сопротивления, поскольку заранее неизвестна искомая функция зависимости β от v, а существующие на заводах испытательные стенды не позволяют получать указанную зависимость эмпирическим путем (см. рис. 3).

Новая конструкция стенда ИГК-90.1 позволяет набрать статистику протоколов для каждого из четырех типов гасителей и после соответствующей обработки полученной информации установить аналитическое выражение функции зависимости β от v или определить поправочные коэффициенты k для полученных значений параметра сопротивления. Сбор статистической базы протоколов испытаний открывает возможности по созданию встроенной в испытательный стенд ИГК-90.1 экспертной системы диагностирования, которая на основании анализа полученных результатов сможет независимо от влияния человеческого фактора определять техническое состояние испытуемых гасителей колебаний при регламентированном обслуживании локомотивов. Однако для этого нужно провести дополнительные экспериментальные исследования, которые и послужат фундаментом для создания экспертной системы.

- 1. *Інструкція* по утриманню, ремонту та випробуванню гасителів коливань локомотивів і моторвагонного рухомого складу. – ЦТ-0062: Затв. Головним управлінням локомотивного господарства Укрзалізниці (Наказ № 53-ц від 27.02.2003).
- 2. Боряк К.Ф., Манзарук М.А., Разумовский А.Л. Пневмоприводной стенд для испытаний гидравлических гасителей колебаний локомотивов // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2012. – **30**, № 3. – С. 31–35.
- 3. *Трусделл К.* Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. – М.: Мир, 1975. – 592 с.
- 4. *Челноков И.И.* Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов. – М.: Транспорт, 1975. – 72 с.
- 5. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.

The paper gives analysis of graphic dependencies between resistance parameter and piston displacement speed obtained empirically for four different types of hydraulic shock absorbers, which are now installed on locomotives of Odessa railway. As the resistance parameter for the hydraulic absorber is the determinant parameter for evaluation of its technical condition, empirically derived values (graphic dependencies) of resistance parameter on speed can quite well be a criterion at diagnostics of shock absorber technical condition. For this purpose, it is necessary to set the numerical values (limits) of confidence interval of measurement error of the resistance parameter and shape of the curve for various operating modes (tension and compression), corresponding to hydraulic shock absorber in good working order. Conducting such technical diagnostics of hydraulic shock absorbers was made possible by the new design of testing facility of "IGK-90.1" grade. The first positive results of operation of testing facility of "IGK-90.1" grade are given. The facility design is based on a new approach proposed by the authors for derivation of damping characteristic (resistance parameter) of the tested hydraulic shock absorber.

K e y w o r d s : hydraulic shock absorber, testing facility, resistance parameter

Поступила в редакцию 17.03.2013

НОВАЯ КНИГА

Сидорец В. Н., Пентегов И. В.

Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.



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 проиллюстрированны.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ТРЕЩИНЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕЕ ПОВТОРЯЮЩЕГОСЯ НАГРУЖЕНИЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, Ю. Б. ДЕНКЕВИЧ, С. А. ГЕРЛОВСКИЙ

Институт прикладной физики НАН Беларуси, 220072, г. Минск, Академическая, 16, Беларусь. E-mail: adcom@iaph.bas-net.by

В несущих конструкциях трещины в большинстве случаев относятся к категории недопустимых дефектов, особенно при динамических и циклических нагрузках. Показано, что повторяющаяся упругопластическая деформация (ПУПЛ) стальных пластин и труб с трещиной может приводить к возникновению в вершине трещины остаточных сжимающих напряжений, уменьшающих концентрацию напряжений и вероятность раскрытия трещины при приложении к ней растягивающих напряжений. Изложены результаты экспериментального и расчетного исследования влияния ПУПД на изменение остаточных напряжений в области трещины. Экспериментальное исследование выполнено на пластинах из малоуглеродистой низколегированной стали C345 200×30×5,5 мм с поверхностными односторонними микротрещинами раскрытием 3 и 5 мкм, радиусами закругления в вершине трещины 1,5 и 2,5 мкм соответственно, глубиной около 1 мм и длиной соответственно 16 и 18 мм, полученными по специальной технологии электрохимической обработкой. На машине Instron образцы периодически нагружались и после каждого нагружения разгружались. Кинетику деформации металла в области трещин непрерывно отслеживали с помощью тензорезисторов с базой 1 мм, наклеенных в области трещины и на основной металл. Выходы тензорезисторов подключались к разработанной в Институте прикладной физики НАН Беларуси многоканальной многофункциональной тензостанции. Расчетное моделирование выполнялось методом конечных элементов. Экспериментально и расчетным путем показано, что повторяющееся нагружение материала с односторонней трещиной до напряжений вблизи предела пропорциональности для основного металла может приводить к возникновению в вершине трещины и в основном металле остаточных сжимающих напряжений. Это происходит за счет того, что при нагружении в вершине и на краях трещины возникают зоны текучести, в которых после разгрузки возникают остаточные сжимающие напряжения. Разгрузка приводит к тому, что основной металл сжимает трещину, создавая в корне остаточные напряжения сжатия. При оптимизации режимов прочность материала с трещиной может приближаться к прочности материала без трещины. Предлагаемый метод моделирования поведения металла в зоне трещины может быть использован для расчетного определения оптимальных режимов, наиболее легко реализуемых при испытаниях тонкостенных трубопроводов. Библиогр. 8, рис. 12.

Ключевые слова: трещина, упругопластическая деформация, концентрация напряжений

В несущих конструкциях трещина в большинстве случаев относится к категории недопустимых дефектов, особенно при динамических и циклических нагрузках [1, 2]. Причинами возникновения трещины могут быть усталость, стресс-коррозия, приложенные напряжения, превышающие предел прочности материала в данном состоянии, остаточные напряжения и др.

Трещина в конструкции является источником концентрации напряжений, как правило, в ее вершине [3, 4]. Для характеристики резкого снижения предельных прочностных характеристик конструкционных материалов в результате возникновения трещины широко используют характеристики трещиностойкости, коэффициент интенсивности напряжений, предел усталости, предел прочности. Для повышения трещиностойкости существуют различные технологические способы, которые чаще всего сводятся к уменьшению концентрации напряжений, в том числе в зарождающихся трещинах: ультразвуковая обработка, засверливание отверстий в вершине трещины, низкотемпературный отпуск, различного типа ловушки трещин, упругопластическая деформация труб внутренним давлением, известная как технология «autofrettage» для толстостенных труб [5-7] или «stress-test» — для тонкостенных [8].

Технология «autofrettage» широко используется для увеличения трещиностойкости толстостенных цилиндров [7]. При нагнетании внутреннего давления в трубе возникает радиально неоднородная упругопластическая деформация и уменьшаются кольцевые напряжения в направлении от внутреннего к наружному диаметрам. При достижении критерия текучести Мизеса–Хенки на внутреннем диаметре от него в направлении наружной поверхности трубы при дальнейшем увеличении давления распространяется зона пластического течения. На внутренних волокнах возникает пластическая деформация растяжения, приводящая к тому, что при последующем снятии давления наружные волокна, сжимаясь, вызывают остаточ-

© В. Л. Венгринович, Ю. Б. Денкевич, С. А. Герловский, 2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ные напряжения сжатия на внутренних, что и способствует возникновению кольцевых напряжений сжатия на внутренней части трубы и повышению трещиностойкости. Количественные характеристики режимов упрочнения этим способом хорошо известны [5-7], однако его применение ограничивается толстостенными цилиндрами.

Ситуация с тонкостенными цилиндрами, оболочками и пластинами далеко не так однозначна, особенно при наличии трещины. На рис. 1, а показано рассчитанное по формулам, приведенным в работах [6, 7], радиальное распределение окружных напряжений в стенке трубы 1220×20 мм при внутреннем давлении 10 МПа, достаточном для возникновения зоны упругопластической деформации, на рис. 1, б это же распределение после снятия внутреннего давления. Возникающие на внутренних волокнах сжимающие напряжения незначительны по величине и не могут существенно влиять на прочностные характеристики трубы. Тем не менее, результат расчета показывает, что в принципе неоднородная упругопластическая деформация пластичных конструкционных материалов может быть источником возникновения остаточных напряжений сжатия, приводящих к снижению риска распространения трещины при воздействии на нее напряжениями растяжения. Возникает вопрос, можно ли повысить влияние этого эффекта в тонкостенных объектах. В настоящей статье изложены результаты экспериментального и расчетного исследования влияния повторяющейся упругопластической деформации



Рис. 1. Расчетное распределение по радиусу окружных напряжений в трубе 1220×20 мм: *a* – при величине внутреннего давления 10 МПа и при отсутствии пластического течения – кривая *C*; *δ* – после снятия внутреннего давления

стальных пластин на изменение остаточных напряжений в области трещины.

Образцы и методика эксперимента. Для исследования поведения металла в области трещины в лабораторных условиях были изготовлены два образца из малоуглеродистой низколегированной стали C345 $200 \times 30 \times 5,5$ мм с поверхностными односторонними микротрещинами раскрытием 3 мкм (образец 1) и 5 мкм (образец 2), глубиной около 1 мм и длиной соответственно 16 и 18 мм, полученными по специальной технологии электрохимической обработкой (рис. 2). В образце 2 перед испытаниями на краю трещины было просверлено отверстие диаметром 1 мм и глубиной 2 мм, чтобы убрать резкий концентратор напряжений в вершине.

Трещины выявлены методом цветной капиллярной дефектоскопии. Предел текучести $\sigma_v = 345$ МПа, предел прочности $\sigma_d = 470$ МПа. Химический состав стали C345 к мас. %: до 0,12 C; 0,17...0,37 Si; 0,3...0,6 Mn; 0,3...0,6 Ni; до 0,04 S; 0,07...0,12 P; 0,5...0,8 Cr; до 0,012 N; 0,08...0,15 Al; 0,3...0,5 Cu.

В ходе эксперимента на машине Instron образцы периодически нагружали и после каждого нагружения разгружали. Поведение дефектов непрерывно отслеживалось с помощью тензорезисторов с базой 1 мм, наклеенных в области тре-



Рис. 2. Образцы с поверхностными микротрещинами раскрытием 3 (a) и 5 мм (б) для исследования поведения металла вблизи трещины



Рис. 3. Расположение тензорезисторов на образцах 1 (а) и 2 (б) при проведении испытаний: 2А – основной металл; 2В – рядом с трещиной; ЗА – над трещиной; ЗВ – над краем трещины; 4А – над просверленным отверстием

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

щины и на основной металл. Выходы тензорезисторов подключали к разработанной в Институте проблем физики НАН Беларуси многоканальной многофункциональной тензостанции. Схема расположения тензорезисторов на образцах представлена на рис.3.

На рис. 4 представлены результаты измерения деформации тензорезисторами в области трещины при повторяющемся нагружении образца 1 до и выше предела текучести (в каждом цикле нагружения). На рис. 5 показана кривая нагружения зависимость деформаций в области трещины от напряжения (отношения усилия к сечению образца) при последовательном нагружении и разгрузке образца 1. На рис. 6 – деформации в области трещины при нагружении образца 2 до разрыва (в третьем цикле нагружения). На рис. 7 – кривые нагружения металла в различных зонах трещины при последовательном нагружении образца 2. На рис. 8 – фото сечения образца 2 после разрыва, на которой в верхней части видна поверхность трещины.

Результаты экспериментов. На рис. 4–7 приведена информация о кинетике деформации в различных зонах образцов, деформируемых в упругопластической области. Как сказано выше, образцы 1 и 2 отличаются тем, что в первом тре-



Рис. 4. Деформации в области трещины при повторяющемся нагружении образца 1 (условные обозначения те же, что и на рис. 3)



Рис. 5. Зависимость деформаций в области трещины от напряжения (отношение усилия к сечению образца) при повторяющемся нагружении образца 1 (обозначения те же, что и на рис. 3)

щина находится в своем естественном состоянии в вершине, а во втором — в вершине сделано разгрузочное закругление радиусом 0,5 мм. Как видно из рис. 4-7, особенности деформации различных зон вблизи трещины принципиально различаются. Образец 1 (рис. 4, 5): три цикла квазистатического нагружения. В первом цикле основной металл (диаграмма 2А) нагружается до предела текучести (є ~0,2 %), что соответствует абсолютному удлинению ~2,0·10-3 мм на базе 1 мм, а раскрытие трещины (3А) при этом опережает удлинение основного металла, причем, абсолютное удлинение на базе 1 мм больше и составляет ~2,5·10⁻³ мм. Совместность деформаций трещины и основного металла обеспечивается тем, что превышение раскрытия трещины компенсируется уменьшением деформации металла рядом с трещиной (2В), абсолютная величина последней не превышает ~1,0·10⁻³ мм. Абсолютную деформацию в корне трещины (3В) оценить трудно из-за неоднородности ее распределения в зоне установки миллиметрового тензодатчика (результаты моделирования деформаций в различных зонах приведены ниже).



Рис. 6. Деформации в области трещины при циклическом нагружении образца 2 до разрыва (в третьем цикле нагружения): 2А - основной металл; 2В - основной металл с противоположной стороны образца; ЗА – рядом с трещиной; ЗВ – над трещиной; 4А – над отверстием



Рис. 7. Зависимость деформаций в области трещины от напряжения (отношение усилия к сечению образца) при циклическом нагружении образца 2 (обозначения те же, что и на рис. 6)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-



Рис. 8. Образец 2 после разрыва

Медленная разгрузка образца приводит к возникновению в конечном итоге остаточных деформаций, неодинаковых в разных зонах образца (рис. 5). При разгрузке скорость закрытия трещины (рис. 4, наклон диаграммы ЗА разгрузки) значительно превышает скорость разгрузки основного металла 2А за пределами трещины; на каком-то этапе (є ~0,12 %) деформации выравниваются, после чего в основном металле согласно условию равновесия возникают остаточные деформации (и напряжения) растяжения, а в области трещины – сжатия (ясно, что первопричиной этого эффекта является неоднородность упругопластической деформации в различных зонах образца при нагружении). Величину остаточной деформации сжатия можно определить путем рассмотрения соотношения остаточных деформаций в различных зонах (рис. 5). Остаточная деформация в корне трещины после первого цикла равна нулю (3В) или даже отрицательна, а деформация трещины (0,02 %) ниже деформации основного металла. Ясно, что разность этих деформаций (0,04 %) действует как давление, сжимающее трещину со стороны основного металла. Приблизительно можно оценить его величину, равную $\sigma = E\varepsilon = 2,1 \cdot 10^{5} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \approx$ ≈ 80 МПа. О правомочности приведенной оценки напряжения, возникающего в трещине, можно говорить только в применении к использованному в экспериментах образцу, в котором длина трещины составляет половину ширины образца. Чем меньше длина трещины, а зона пластического течения в корне больше, тем значительнее будет эффект сжатия или «упрочнения» трещины.

На втором цикле максимальная деформация в основном металле была увеличена до ε ~0,45 % (см. рис. 4) и сопровождалась явно выраженным пластическим течением (рис. 5). При разгрузке описанный эффект образования остаточных деформаций сжатия в основном металле стал еще более интенсивным, остаточная деформация в корне трещины незначительно увеличилась и составила приблизительно 0,01 % (3В), деформация в основном металле 2A – 0,25 %, а деформация трещины 3А – 0,1 %. Сжимающее давление, оказываемое основным металлом на трещину, составляет, следовательно, 0,15 %, а соответствующее напряжение сжатия примерно 300 МПа, благодаря которому возникает эффект «упрочнения» трещины. Таким образом, упрочнению трещины способствует нарастающая положительная разность между остаточной деформацией основного металла и трещины. Возникает возможность реализации эффекта «упрочнения» трещины при ее повторном нагружении, своего рода режим «crack-train» — «тренинг для трещины».

Однако уже на третьем этапе эффект «упрочнения» не наблюдался, несмотря на значительную абсолютную величину деформации основного металла при нагружении. По нашему мнению, это связано с предшествующим «упрочнением» трещины и задержкой по этой причине начала пластического течения металла в корне (как видно из рис. 5, оно вообще не возникает). Эффект упрочнения отражается также и на величине напряжения разрушения, которое, как видно из сравнения рис. 5 и 7, для двух видов образцов примерно одинаковое несмотря на устранение концентратора напряжений в образце 2.

Образец 2 (рис. 6, 7): появление разгрузочного отверстия в вершине трещины существенно меняет характер неоднородности напряженно-деформированного состояния. Наиболее значительное неупругое поведение демонстрирует параметр раскрытия трещины (3В). Практически на всех этапах нагружения и разгрузки образца раскрытие трещины превышает деформацию основного металла. Деформации в разгрузочном отверстии (4А) и в основном металле (2В диаграммы для обеих сторон образца) выравниваются и становятся близкими друг к другу, а раскрытие трещины 3В увеличивается вплоть до разрушения образца на третьем этапе. Разгрузочное отверстие способствует, таким образом, выравниванию деформаций в разных зонах образца и нивелированию эффекта «упрочнения» в корне. Наблюдается также значительное различие деформаций основного металла в пластине со стороны трещины и с обратной стороны (диаграммы 2А и 2В соответственно). Со стороны трещины деформация основного металла остается все время ниже. Это различие возникает, чтобы обеспечить совместность деформаций в различных зонах образца.

Численное моделирование. Численное моделирование осуществлялось с помощью метода конечных элементов. В качестве модели использовалась пластина с трещиной с параметрами, близкими к параметрам образцов, которые использовались при экспериментальном исследовании поведения трещин. Вычисления проводили с учетом возникновения зоны пластичности в основном металле, на трещине и ее краях. При этом применялись условия текучести Треска (III теория прочности) и фон Мизеса (IV теория прочности).

В качестве модели брали поверхностную трещину длиной 16 мм, глубиной 1 мм и раскрытием 0,1 мм, расположенную в пластине с рабочим

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

сечением 40×4 мм. В качестве кривой напряжения–деформации при моделировании использовали экстраполированную кривую, полученную при испытаниях на образцах (рис. 9).

На рис. 10 представлено использованное при расчетах разбиение фрагмента модели (1/4 симметричная часть области расчета) на конечные элементы. Средние размеры элементов составляли 0,1 мм в области трещины и 1 мм – в остальной области. Общее количество элементов фрагмента составляло 49805, узлов – 74587. При расчетах модель «нагружали» таким образом, что напряжения в бездефектной части модели либо соответствовали напряжениям примерно 67 % предела текучести для этой стали, либо величине, равной пределу текучести. Для выбранной модели эти напряжения составляли примерно 200 и 300 МПа соответственно.

На рис. 11, 12 показаны результат моделирования кинетики деформации образца с трещиной. Представлено характерное расчетное распределение напряжений в области трещины при последо-



Рис. 9. Экстраполированная кривая упругопластической деформации, полученная экспериментально для образцов стали C345 (экспериментальные данные – кривая *OA*)



Рис. 10. Разбиение фрагмента модели на конечные элементы

вательном нагружении до 200 МПа и снятии нагрузки. Как видно из рисунков, при нагружении



Рис. 11. Распределение напряжений в области трещины при нагружении (*a* – вид сверху; *б* – продольный разрез) и снятии нагрузки (*в* – вид сверху; *г* – продольный разрез)



Рис. 12. Зависимость напряжений вблизи вершины трещины, края трещины и в бездефектной области от времени при нагружении, имитирующем «стресс-тест» испытания: 1 – вершина трещины; 2 – край трещины; 3 – основной металл

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

в вершине и на краях трещины возникают зоны текучести, в которых после разгрузки возникают остаточные сжимающие напряжения. Это сопровождается тем, что при разгрузке уменьшение деформации трещины в какой-то момент опережает снижение деформации основного металла. Последующая разгрузка приводит к тому, что основной металл как-бы сжимает трещину, создавая в корне остаточные напряжения сжатия. Расчет показал, что при последующем нагружении до 200 МПа характер распределения напряжений под нагрузкой и остаточных напряжений практически не меняется.

Выводы

Экспериментально и расчетным путем показано, что повторяющееся нагружение материала с односторонней трещиной до напряжений предела пропорциональности для основного металла может приводить к возникновению в вершине трещины и в основном металле остаточных сжимающих напряжений, уменьшающих концентрацию напряжений в корне трещины и вероятность раскрытия трещины при приложении к ней растягивающих напряжений, своего рода «crack-train» – «тренинг для трещины». При оптимизации режимов «crack-train» прочность материала с трещиной может приближаться к прочности материала без трещины.

Предлагаемый метод моделирования поведения металла в зоне трещины может быть использован для расчетного определения оптимальных режимов «crack-train», наиболее легко реализуемых при «stress-test» испытаниях тонкостенных трубопроводов.

Обычно достаточно одного-двух циклов нагружения при оптимальных режимах для достижения желаемого эффекта упрочнения. Последующие циклы нагружения, как правило, по крайней мере, не усиливают этого эффекта.

Предварительное перед циклом «crack-train» снятие концентратора напряжений в вершине трещины путем засверливания в ней разгрузочных отверстий не способствует последующему проявлению эффекта «упрочнения», который является результатом значительной пространственной неоднородности напряжений в области трещины при ее деформации растяжением.

- 1. *Партон В. 3., Борисковский В. Г.* Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, 1988 240 с.
- 2. *Н. Ф. Морозов, Петров Ю. В.* Проблемы динамики разрушения твердых тел.– С.-Пб: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 1997. – 132 с.
- Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения / Под ред. В. М. Сафрай.– М.: Наука, 1974. – 640 с.
- 4. Гольдитейн Р. В. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Наука, 1988. 200 с.
- 5. *Parker A. P.* Autofrettage of open-end tubes pressures, stresses, strains, and code comparisons // J. of pressure vessel technology. 2001. **123**. P. 271–277.
- Majzoobi G. H., Farrahi G. H., Mahmoudi A. H. A finite elementsimulation and an experimental study of autofrettage for strain hardenedthick-walled cylinders // J. Mater. Sci. Eng. A. – 2003. – 359. – P. 326–331.
- Franklin G. J., Morrison J. L. M. Autofrettage of cylinders: prediction pressure, external expansion curves and calculation of residual stresses // Proc. of Institute of Mechanical Eng. – 1960.– 174. – P. 947–974.
- Б. Н. Антипов, В. Н. Понамарев, А. С. Вятин. Технология испытаний для реабилитации магистральных газопроводов после ремонта // Экспозиция нефть-газ. – 2009. – №2. – С. 29–31.

In load-carrying structures a crack belongs to the category of inadmissible defects, particularly under dynamic and cyclic loads. It is shown that recurrent elasto-plastic deformations (REPD) of steel plates and pipes with a crack may lead to initiation in the crack tip of residual compressive stresses, reducing the stress concentration and the probability of crack opening at application of tensile stresses to it. Results of experimental and calculation-based investigations of REPD influence on the change of residual stresses in the vicinity of the crack are described. Experimental investigations were performed on plates from low-carbon steel S345 200x30x5.5 mm with surface one-sided microcracks with 3 and 5 ~m opening, rounding-off radii in the crack tip of 1.5 and 2.5 ~m, depth of about 1 mm and length of 16 and 18 mm, respectively, made by the special technology of electrochemical treatment. In Instron machine the samples were periodically and unloaded after each loading. Kinetics of metal deformation in the vicinity of the crack was traced continuously using strain gauges with 1 mm base, pasted in the vicinity of the crack and on the base metal. Strain gauge outputs were connected to multichannel multifunctional tensostation developed at the Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus. Calculation modeling was performed by finite element method. It was proved experimentally and by calculations that recurrent loading of the material with a one-sided crack up to stresses close to proportionality limit for the base metal, can induce residual compressive stresses in the crack tip and in the base metal. It occurs due to appearance of yield zones in the crack tip and on its edges at loading, where residual compressive stresses develop after unloading. Unloading leads to base metal compressing the crack, thus inducing residual compressive stresses in the root. At mode optimization, the strength of material with a crack can be close to that of material without a crack. The proposed method of modeling metal behaviour in the crack zone can be used for calculation of optimum modes, the most readily implemented at testing of thin-walled pipelines.

Keywords: crack, elasto-plastic deformation, stress concentration

Поступила в редакцию 17.01.2013

ГИДРОИСПЫТАНИЯ ТРУБНЫХ СЕКЦИЙ С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ В РЕЖИМЕ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

П.С.ЮХИМЕЦ, А.А.РЫБАКОВ, В.А.НЕХОТЯЩИЙ, Т.Н. ФИЛИПЧУК

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

Рассмотрены особенности развития эксплуатационных коррозионных дефектов трубопроводов при малоцикловом режиме нагружения внутренним давлением. Гидравлические испытания поврежденных труб выполняли на стенде. Напряженно-деформированное состояние образцов при нагружении внутренним давлением исследовали на основании расчетов методом конечных элементов. Выявлено, что влияние размеров дефекта на статическую прочность и концентрацию напряжений (циклическую прочность) различно, поскольку степень снижения статической прочности определяется, в первую очередь, длиной и глубиной дефекта, а его влияние на коэффициент концентрации напряжений зависит, кроме того, и от ширины. Расчет долговечности основывался на результатах анализа напряжений и нормативных показателях механических свойств материала. Оценка выполнялась с использованием усталостной кривой с введенными коэффициентами запаса по условным напряжениям n_{σ} – 2, количеству циклов n_N – 20. Полученные результаты показали, что эксплуатация испытываемых труб при допустимом расчетном давлении небезопасна. Циклические испытания натурных образцов подтвердили возможность малоциклового разрушения в зоне коррозионных дефектов в период эксплуатации трубопровода вследствие возникновения продольной усталостной трещины на поверхности повреждения. Установлено, что малоцикловая прочность трубопровода определяется уровнем местных циклических деформаций в дефекте, который зависит от его размеров и параметров эксплуатационной нагрузки. Библиогр. 8, табл. 6, рис. 6.

Ключевые слова: трубопроводы, коррозионные дефекты, гидравлические испытания, малоцикловая прочность

Коррозия, протекающая в условиях периодического изменения внутреннего давления от атмосферного до давления перекачивания продукта [1], является основной причиной отказов нефтепроводов [2]. В связи с этим проведено изучение особенностей развития эксплуатационных коррозионных повреждений при малоцикловом режиме нагружения.

Для проведения гидравлических испытаний эксплуатирующая организация предоставила отрезки труб с коррозионными повреждениями, вырезанные из нефтепроводов: бесшовной D273×9 длиной 1000 мм, а также прямошовной D530×8 длиной 5500 мм (табл.1).

Взаиморасположение, внешний вид и размеры дефектов представлены на рис.1,2 и в табл.2.

Проведенные испытания стандартных образцов не выявили существенных изменений характеристик механических свойств основного металла и металла продольного шва исследованных труб под воздействием эксплуатационных нагрузок на протяжении всего срока эксплуатации. Уровень показателей прочности, пластичности и вязкости основного металла труб, а также металла продольного сварного соединения является типичным для труб производства 1960-х годов и отвечает требованиям как нормативных документов, по которым они изготовлялись, так и современных действующих нормативных документов [3-5].

Металлографический анализ макро- и микрошлифов, вырезанных из различных участков основного металла и сварных соединений, также не зафиксировал существенных изменений структурных характеристик материала исследованных труб под воздействием эксплуатационных нагрузок на протяжении 43...50 лет. Металл трубы D273 имеет структурные характеристики, присущие стали такого класса: ферритно-перлитная структура с 7-8 номером ферритного зерна [6], значительная загрязненность неметаллическими включениями (рис.3,а). Структура основного металла и металла продольного сварного соединения образца D530 типична для труб, которые изготавливались на Харцызском трубном заводе в 1960-е годы с применением горячей обработки: нагрев до

Номинально	е значение		Рабочее	Расчетное давле-	Срок эксплуатации	Количество ци-
Наружный диаметр <i>D</i> _n , мм	Толщина стенки <i>h</i> , мм	Материал	давление Р _р , МПа	ние разрушения P_{f} МПа	Т _э , лет	клов в месяц N_m
273	9	Сталь 20	4,1	25,9	~50	3-4
530	8	МК (10Г2СД)	4,8	16,4	43	2

Таблица 1. Характеристики испытуемых труб

© П.С.Юхимец, А.А.Рыбаков, В.А.Нехотящий, Т.Н. Филипчук, 2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 1. Труба D273 с указанными расстояниями между дефектами – центрами пересечения диагоналей, очерченных вокруг них прямоугольников

температуры 910 \pm 20 °С и последующая горячая правка (рис.3, δ).

Для проведения испытаний к испытательным образцам D273 и D530 должным образом были присоединены донышки, патрубки подачи воды, контрольная и измерительная аппаратура. Гидравлическое испытание выполняли в специальном стенде с применением гидроагрегата ПТ-1-1-400 с производительностью 1000 л/ч. В качестве рабочей среды использовали воду с температурой не ниже +10 °С. Управление процессом гидроиспытания осуществлялось в автоматическом режиме. Период одного цикла нагружения образца D273 составлял 35...40 с. образца D530 - около 90 с. Схема нагружения образцов представлена в табл.3. На последнем этапе нагружения образца D273 после 2060 циклов при давлении 20 МПа произошло его разрушение в результате появления сквозной трещины усталости на



Рис. 2. Схема расположения зоны коррозионного повреждения трубы D530

дне язвы *V*. Испытания образца D530 было прекращено на 1100-м цикле из-за истечения воды сквозь трещину усталости длиной 25 мм, образовавшейся в зоне язвы глубиной 6 мм (рис.4).

Напряженно-деформированное состояние образцов при нагружении внутренним давлением исследовалось на основании расчетов МКЭ. Для проведения расчетов были построены соответствующие геометрические модели. Некоторые результаты расчета НДС образцов представлены на рис.5.

Оценка влияния рассматриваемых дефектов на величину разрушающего давления P_f при статическом нагружении была выполнена с использованием данных работы [7]. Результаты расчета разрушающего давления представлены в табл.2. Расчет прочности трубы D273 проводился для каждого из дефектов как для одиночного (без учета взаимовлияния). Здесь же приведены значения коэффициента концентрации напряжений (ККН) α_{σ} в дефектах, вычисленные на основании расчета упругих напряжений МКЭ.

Как следует из таблицы, каждый из пяти дефектов

0,80 3,86
0,95 2,04
0,97 2,24
0,96 2,37
0,86 4,80
0,75 5,49
-

Таблица	2.	Параметры деф	ектов
r			

Примечания: * 2*с* – длина; 2*d* – ширина; *b* – глубина дефекта; ** $\phi = P_{df}/P_{p}$ где P_{df} – давление разрушения трубы с дефектом



Рис. 3. Микроструктура металла D273 (*a*), ×50 и металла 3TB трубы D530 (*б*), ×100

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 🌙

трубы D273 способствовал снижению ее прочности, при этом наиболее существенное влияние обусловлено наличием дефекта I (коэффициент снижения прочности $\varphi = 0,80$). Отметим, что максимальная концентрация напряжений $\alpha_{\sigma} = 4,80$ наблюдалась в дефекте V. Таким образом влияние размеров дефекта на статическую прочность и концентрацию напряжений (циклическую прочность) различно, поскольку степень снижения статической прочности определяется длиной и глубиной дефекта, а его влияние на ККН зависит, кроме того, и от ширины. Данные эксперимента подтвердили, что из всех рассмотренных дефектов **Таблица 3. Параметры нагружения** наибольшую опасность при циклическом нагружении представлял дефект трубы D530 ($\phi = 0,75, \alpha_s = 5,49$).

Результаты расчета НДС образцов труб при воздействии эксплуатационного рабочего давления показали, что в дефектах трубы D273 при рабочем давлении (P = 4,1 МПа) пластические деформации отсутствовали, в то время как в дефекте трубы D530 при давлении P = 4,8 МПа они достигали 0,18 %. Для расчета деформаций в упругопластической области нагружения использовалась модель билинейного изотропного упрочнения и механические свойства материала, полученные

	<u> </u>						
Образец	<i>N_i</i> , цикл	Р _{тах} , МПа	P_{\min} , МПа	$P_{\rm max}/P_n$	$\overline{\sigma}_{_{\rm H}}$	N_{f}	d
	11820	6,1	0,4	0,40	0,267	>106	0
	1102	10,3	0,5	0,68	0,451	25440	0,043
D273	1	16,8	0	1,11	0,720	858	0,001
	6110	18	0,5	1,19	0,789	610	0,100
	2060	20	0,5	1,32	0,876	357	5,7
D530	1100	6,2	0,2	0,78	0.449	546	2,01
77 37	•						

Примечания: N_i – количество циклов нагрузки *i*-го уровня; N_f – количество циклов до разрушения согласно [8]; P_{max} , P_{min} – соответственно максимальное и минимальное давление в цикле нагружения; P_n – нормативное давление; $\overline{\sigma}_{_{\rm H}}$ – интенсивность номинального напряжения, отнесенная к интенсивности напряжения текучести материала $\sigma_{_{\rm T}}$



Рис. 4. Трещина усталости (отмечена стрелкой) на внутренней (a) и наружной (б) поверхности коррозионной язвы трубы D530





Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений при нагружении внутренним давлением 1 МПа на поверхности образца: *a* – D273; *б* – D530

人 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

при испытании стандартных образцов.

Следует отметить, что трубопроводы D273 и D530, из которых были отобраны экспериментальные образцы, использовали недостаточно эффективно – давление перекачивания продукта, при котором они эксплуатировались, было существенно ниже расчетного допустимого давления P_n [4] для труб соответствующего типоразмера согласно табл.4:

 $P_n = 2hR_1 / n(D_n - 2h), n$ – коэффициент надежности по нагрузке трубопровода; R_1 – расчетное сопротивление материала трубы: $R_1 = R_1^n m / k_1 k_n (R_1^n - минимальное значение временного сопротивления материала трубы; <math>m$ – коэффициент условий работы трубопровода; k_1 – коэффициент надежности по материалу; k_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода).

Как следует из табл.4, давление перекачивания продукта в нефтепроводе D273 составляло 0,27...0,33, а в нефтепроводе D530 – 0,61...0,73 (в зависимости от категории участка) от расчетного допусимого давления.

Испытание образца D273 (табл.3) выполнялось в достаточно широком диапазоне изменения давления: минимальный уровень составлял 0,4, а максимальный – 1,32 нормативного давления. Пульсация давления в образце D530 фактически соответствовала условиям эксплуатации нефтепро-

Таблица 4. Нормативное давление в нефтепроводе в зависимости от категории участка трубопровода ($K_1 = 1,55; P_n = 1$)

Типораз- мер	Категория участка нефтепровода	R_{1}^{n}	т	<i>Р</i> _{<i>n</i>} , МПа	$P_{\rm p}/P_{\rm n}$	
	Ι		0,75	12.6	0.22	
273×9	II	420	0,75	12,0	0,33	
	III	420	0,9	15,1	0.27	
	IV		0,9		0,27	
	Ι		0,75	6.6	0.72	
530×8	II	400	0,75	0,0	0,75	
	III	490	0,9	7.0	0.61	
	IV		0,9	7,9	0,01	

вода ($P_{\text{max}}/P_n = 0,78$). На всех уровнях нагружения образцов в эксперименте изменение напряжений в основном металле происходило в упругой области ($\sigma_1 < 1$).

^{*п*}Результаты оценки допустимого числа полных циклов [*N*] изменения рабочего давления P_p , с учетом наличия каждого из описанных выше дефектов, выполненной согласно рекомендациям стандарта [8], представлены в табл.5.

В качестве критерия разрушения использовано число циклов до зарождения усталостной трещины. Расчет основывается на результатах упругого анализа напряжений и нормативных показателях механических свойств материала. Оценку выполняли с использованием усталостной кривой *l* (рис.6) с введенными коэффициентами запаса по условным напряжениям $n_a - 2$, количеству циклов $n_N - 20$.

Полученные результаты показывают, что эксплуатация нефтепроводов D273 и D530 с учетом наличия рассматриваемых дефектов в фактическом режиме (табл.1) не представляет опасности по критериям циклической (табл.5) и статической прочности (табл.2). Минимальное допустимое число полных циклов, обусловленное дефектом в трубе D530 [N] = 1449 при эксплуатационной нагруженности 50 циклов в год обеспечивает остаточный ресурс трубопровода примерно 30 лет.

По аналогии был проведен расчет допустимого числа полных циклов при рабочем давлении $P_p = P_n$ (табл.6). Полученные результаты показывают, что дальнейшая эксплуатация нефтепроводов в режиме максимально возможного рабочего (нормативного) давления является практически небезопасной, так как число допустимых циклов [N] в этом случае составляет: для трубопровода D273 – 169, трубопровода D530 – 19 циклов. Число циклов до разрушения N_f (рис.6, кривые 4,5), установленные с использованием усталостных кривых (кривые 2,3), основанных на действительных механических свойствах материала образцов, являются также весьма ограниченными. Отметим, что

Диаметр трубы, мм	Номер дефекта	<i>P</i> _p , МПа	Δσ _{iy} , ΜΠa	K _e	σ _a , ΜΠα	[<i>N</i>], цикл
273	Ι	4,1	192,98	1,0	96,5	3,62.105
	II		102,83		51,4	>106
	III		106,07		53,0	>106
	IV		120,95		60,5	>106
	V		241,98		121,0	1,60.105
530	_	4,8	783,36	1,27	498,0	1449

Таблица 5. Допустимое число полных циклов изменения рабочего давления

Примечания: Δσ_{iy} – размах интенсивности напряжений при условии упругого деформирования; *K_e* – коэффициент повышения деформаций в упругопластической области; σ_a – амплитуда интенсивности условно-упругих напряжений

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

	<u>\</u>
	Δ.
L	
_	

Таб	лица	6.	Оценка допустимого числа циклов при нормативном давлении
-----	------	----	--

Диаметр трубы, мм	Номер дефекта	Размеры дефекта: $c \times d \times b^*$	P _n	<i>Р_,</i> МПа	K _e	S_{alt}^{k}	[<i>N</i>]*	N_{f}^{**}
273	V	68×45×7,5	15,1	23,2	2,566	1143,4	169	1546
530	-	60×15×6	7,9	12,3	4,474	2883,9	19	112
Примечания: * – согла	Примечания: * – согласно кривой 1 (рис.6); ** – согласно кривым 2, 3 (рис.6) соответственно; S_{nk}^{k} – эффективная амплитуда							

Примечания: * – согласно кривой 1 (рис.6); ** – согласно кривым 2, 3 (рис.6) соответственно; S_{alt} – эффективная амплитуда напряжений [8]



Рис. 6. Усталостные кривые: 1 – расчетная для низкоуглеродистых сталей [API]n_o = 2; n_N = 20; 2 – материала образца D273; 3 – D530; 4,5 – долговечность при нормативном давлении в трубе D530 и D733 соответственно; 6 – разрушение образца D530; 7 – D273

при рабочем давлении, не превышающем нормативное и фиксированных размерах рассматриваемых дефектов, опасность представляет именно циклическое нагружение вследствие накопления усталостного повреждения, в то время как запас статической прочности остается на одном уровне.

Оценку повреждаемости, накопленной в процессе испытаний, выполняли с использованием усталостных кривых 2, 3 (рис.6). В табл. 3 приведены результаты расчета повреждаемости в дефекте образца D530 и дефекте V образца D273. Как видим, действительная повреждаемость при испытаниях превысила расчетную: в случае образца D273 – более чем в 5 раз, D530 – в 2 раза. Это указывает на достаточно высокую консервативность применяшейся методики [8]. Результаты определения экспериментальной долговечности образца D530 и D273 даны на рис.6 (6 и 7, соответственно). Долговечность образца D273 приведена к уровню нормативного давления $P_n = 15,1$ МПа.

Выводы

Проведенные циклические испытания натурных образцов подтвердили возможность малоциклового разрушения в период эксплуатации трубопровода вследствие возникновения продольной усталостной трещины в зоне коррозионного повреждения.

Малоцикловая прочность определяется уровнем местных циклических деформаций в дефекте, который зависит от его размеров и параметров эксплуатационной нагрузки.

- Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении. Обзорная информ. / М.И. Волский, А.С. Аистов, А.П. Гусенков, Л.К. Гуменный // Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1979. – 56 с.
- Иванцов О. М. Надежность и экологическая безопасность магистральных трубопроводов – в XXI век». – Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1998. – С.99–109.
- ЧМТУ/УкрНИТИ 182-60. Трубы сварные прямошовные. Технические условия.
- СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 59 с.
- 5. ГОСТ 8731-74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные.
- ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
- 7. Assessment of the strength and residual life of pipelines with erosion-corrosion damage. E.F.Garf, M.A.Netrebsky // The Paton Welding J. 2000. № 9,10. P.13–18.
- Fitness-for-service. API Recommended practice 579. First ed., January 2000.

Features of development of in-service corrosion defects in pipelines at low-cycle mode of loading by inner pressure were studied. Hydraulic testing of damaged pipes was performed in the testing facility. Stress-strain state of the samples at loading by inner pressure was studied on the basis of calculation by finite element method. It is revealed that the influence of defect size on static strength and stress concentration (cyclic strength) is different, as the degree of static strength lowering is determined, primarily, by the length and depth of the defect, and its influence on stress concentration factor also depends on width. Calculation of fatigue life was based on the results of analysis of stresses and normative values of material mechanical properties. Evaluation was performed using S-N curve with introduced margins on engineering stress, $n_{\sigma} - 2$, and cycle number $n_N - 20$. Derived results showed that operation of tested pipes at admissible design pressure is unsafe. Cyclic testing of full-scale samples confirmed the possibility of low-cycle fracture in the corrosion defect zone during pipeline service, as a result of initiation of a longitudinal fatigue crack on the damaged surface. It is established that pipeline low-cycle strength is determined by the level of local cyclic deformations in the defect that depends on its dimensions and parameters of service load.

K e y w o r d s : pipelines, corrosion defects, hydraulic testing, low-cycle strength

Поступила в редакцию 11.01.2013

ДОСВІД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИЯВЛЕНИХ ДЕФЕКТІВ ВНУТРІШНЬОТРУБНОЮ ДІАГНОСТИКОЮ В ДК «УКРТРАНСГАЗ»

Ю.В. БАНАХЕВИЧ¹, Р. Ю. БАНАХЕВИЧ²

¹ДК «Укртрансгаз». 01021, м. Київ, Кловський узвіз, 9/1. Е-mail: banakhe-vich-yv@utg.ua, ²УМГ «Львівтрансгаз». 79000, м. Львів, вул. Рубчака, З. Е-mail: banakhevich-ru@utg.ua

Надзвичайно важливою складовою технічної діагностики магістральних газопроводів в ДК «Укртрансгаз» є внутрішньотрубне обстеження металу труби, діагностика. Основне завдання діагностики – визначення фактичного технічного стану газопроводу і обладнання, яке встановлене на ньому, з наступним ремонтом виявлених дефектів для забезпечення надійної роботи об'єкта. Несвоєчасне виконання діагностичних та ремонтних робіт веде до збільшення появи відмов та виникнення аварійних ситуацій. В статті описано випадок діагностування та визначення причин утворення поздовжніх тріщин на зовнішній поверхні труби. Показано важливість вчасного та правильного реагування на результати діагностики та описано досвід ДК «Укртрансгаз» в проведенні заходів з оптимізації процесів ремонту магістральних газопроводів шляхом чіткого встановлення строків як оцінки результатів внутрішньотрубної діагностики, так і формування планів з ремонту, визначення критеріїв вибору дефектів для ремонту, встановлення єдиного підходу до процесу, в тому числі і до технічної документації. Переймаючи прогресивний світовий досвід, ДК «Укртрансгаз» впроваджує в експлуатацію систему управління цілісністю трубопроводів, що базується на існуючій географічній інформаційній системі паспортизації і технічного моніторингу магістральних газопроводів та аналітичному програмно-апаратному комплексі, що розробляється. Бібліогр. 6, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: технічна діагностика, магістральний газопровід, внутрішньотрубна діагностика, ремонт дефектів, система управління цілісністю газопроводів

Для забезпечення надійної експлуатації магістральних газопроводів (МГ) та згідно із річними програмами діагностування лінійної частини, ДК «Укртрансгаз» періодично контролює технічний стан газопроводів з використанням приладів та технічних засобів. В тому числі, з 1996 р. виконуються роботи з внутрішньотрубної діагностики (ВТД) МГ. Основне завдання діагностики – визначення фактичного технічного стану газопроводу і обладнання, яке встановлене на ньому, з наступним ремонтом дефектних місць для забезпечення надійної роботи об'єкта мінімум на 5 років [1, 2]. Несвоєчасне виконання діагностичних та ремонтних робіт веде до збільшення появи відмов та виникнення аварійних ситуацій з непередбачуваними наслідками [3].

За період 1996–2012 рр. виконано більше 16 тис. км корозійного обстеження та 7,2 тис. км обстеження з виявлення поздовжніх дефектів МГ в однонитковому розрахунку. Слід відзначити, що станом на сьогоднішній день виконано внутрішньотрубне обстеження всіх МГ, обладнаних камерами прийому-запуску поршнів. За згаданий вище період часу було виявлено та ліквідовано більше 31 тис. аварійно-небезпечних дефектів і попереджено велику кількість аварійних ситуацій на лінійній частині МГ газотранспортної системи (ГТС) ДК «Укртрансгаз». Застосування ВТД дозволило виявити дефекти, допущені в ході виробництва труб на заводах, що їх виготовляють, так звані заводські дефекти (шлакові включення, розшарування металу труби тощо), дефекти, утворені в ході будівництва газопроводів будівельними організаціями (непровари, пори, вм'ятини, тріщини, зміщення кромок труб тощо) внаслідок неправильної організації робіт та не надто високої кваліфікації виконавців, дефекти експлуатаційного характеру, які викликані недосконалістю ізоляційного покриття та помилками в організації експлуатації засобів електрохімзахисту, високою корозивною агресивністю навколишнього середовища тощо [4, 5].

Цікавий і по своєму характеру унікальний випадок стався в 2008 р. на МГ Уренгой–Помари– Ужгород (МГ УПУ) Ду 1400 Ру 7,4 МПа. За результатами виконаного в серпні 2007 р. пропуску поршня для виявлення поздовжніх дефектів по дільниці КС Іллінці–КС Бар на 3871,81 км МГ УПУ (20259,8 м від камери запуску по «Rosen») було виявлено дефект, ідентифікований як втрата металу – заводська аномалія на поздовжньому шві глибиною 11 % від товщини стінки труби довжиною 454 мм, шириною 14 мм. На рис.1 представлено фрагмент паспорту дефекту з технічного звіту фірми «Rosen», яка виконувала ВТД газопроводів ДК «Укртрансгаз» в 2007 р.

В ході обстеження діагностичною лабораторією філії УМГ «Черкаситрансгаз» цього дефекту ультразвуковим дефектоскопом «Einstein-2» вияв-

© Ю. В. Банахевич, Р. Ю. Банахевич, 2013





log dist. : 20259.80 m easting : 596063.4835 m northling : 48467.4706 m heighting : 260.5557 m wt : 15.00 mm o'clock : 07:09 event : metal loss-milling feature depth : 11 % length : 454 mm width : 14 mm cluster : - comment : on long seam

Рис. 1. Фрагмент паспорту дефекту з технічного звіту, який надає компанія «Rosen»

лено розтріскування основного металу тіла труби довжиною 3000 мм та глибиною 1,5 мм, які показано на рис. 2.

Для експертного обстеження небезпечної дільниці МГ УПУ з метою визначення причини утворення поздовжніх тріщин на зовнішній поверхні труби були додатково залучені також фахівці наступних організацій:

 – ДП «Центр сертифікації і контролю якості будівництва об'єктів нафтогазового комплексу»;

 – Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України:

- НВЦ "Техдіагаз".

Під час проведення експертного обстеження встановлено, що траса дільниці МГ УПУ підземного прокладання перетинає місцевість з болотами з водорозділом ґрунтових вод на рівні нижньої утворюючої газопроводу. Для запобігання спливання газопроводу на поверхню землі застосовані бетонні привантажувачі типу УБО, які змонтовані з обох боків трубопроводу.

Були виконані наступні обстеження:

 візуально-оптичний огляд дільниці біля шовної зони поздовжнього зварного шва труби Ду 1400 з поверхневими тріщинами;

 неруйнівний ультразвуковий контроль дільниці біля шовної зони поздовжнього зварного з'єднання труби Ду 1400 з метою виявлення глибини проникнення тріщини в метал трубопроводу;

 неруйнівний капілярний контроль дільниці біля шовної зони поздовжнього зварного з'єднання труби Ду 1400 з метою більш детального виявлення дільниць з виходами тріщин на поверхню металу



Рис. 2. Поздовжня тріщина (фронтально) (1) та інші тріщини навколо шовної зони (2)

трубопроводу;

 проведено електрометричні виміри системи EX3 газопроводу з метою визначення захисного та поляризаційного потенціалу;

 проведено контроль якості ізоляційного покриття;

 визначено напружений стан металу труби газопроводу на цій дільниці;

– визначено причини утворення тріщин на зовнішній поверхні газопроводу.

Результати обстежень показали наступне.

1. Під час візуально-оптичного огляду зовнішньої поверхні дільниці біля шовної зони поздовжнього зварного шва виявлено:

 – білий наліт на поверхні металу у районі нижньої утворюючої газопроводу під шаром ізоляції та праймера;

– після зняття білого нальоту виявлено сходинкове нашарування поверхні металу труби (виконане металевим пристроєм) з однієї сторони поздовжнього зварного з'єднання, яке розташоване по всій довжині труби на відстані 7 мм від зварного і має різницю висот металу до 0,6 мм та поздовжніх рисок довжиною 0,5 м з другої сторони зварного з'єднання;

– в зоні поздовжнього зварного шва труби виявлена тріщина загальною довжиною до 3000 мм (в зоні сходинкового нашарування поверхні), яка розташована поздовж зварного з'єднання і має переривчастий характер з виходом на поверхню металу труби;

 поверхня металу труби не має корозійних виразок чи інших проявів корозійного процесу.



Рис. 3. Загальний вигляд поверхні після проведення діагностування капілярним методом контролю

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2. При проведенні ультразвукового контролю дільниці біля шовної зони поздовжнього зварного шва труби Ду 1400 виявлено наступне:

 тріщина в деяких місцях має глибину до 5 мм. Розповсюдження тріщини відбувається у напрямку поздовжнього зварного з'єднання. Характер тріщини переривчастий, направлений під кутом 90° вглиб металу труби, загальна довжина до 3000 мм.

3. При проведенні капілярного контролю дільниці біля шовної зони поздовжнього зварного з'єднання труби Ду 1400 (рис. 3) виявлено:

– на поверхні металу трубопроводу на відстані 7...15 мм від поздовжнього зварного шва розташований ланцюжок поверхневих тріщин з розгалуженими кінцями загальною довжиною до 3000 мм, які мають тенденцію до поєднання між собою у напрямку вдовж твірної газопроводу.

4. При проведенні електрометричних робіт із заміру параметрів ЕХЗ виявлено:

– захисний поляризаційний потенціал газопроводу складає –1,25V, значення якого завищено на 0,15V і є порушенням вимог таблиці №5, примітка 2 ДСТУ 4219, що може сприяти відшаруванню ізоляційного захисного покриття;

при вимірюванні потенціалу стаціонарного електроду (металева пластина з марки сталі аналогічної до марки сталі трубопроводу) у ґрунті на відстані 2,5 м від газопроводу і на відстані 0,05...0,1 м від стінки газопроводу виявлена різниця стаціонарних потенціалів між ними, значення якого складає 0,1V, що, в свою чергу, вказує на наявність різниці електролітичних розчинів у ґрунті, а саме – на наявність лужного середовища біля стінки газопроводу.



Рис. 4. Радіографічний знімок дефектного місця

5. При визначенні рН середовища (грунт та грунтові води у шурфі) виявлено:

 взаємодія ґрунту та ґрунтових вод з хімічними реагентами виявила нейтральну реакцію pH = 7;

 – взаємодія ґрунту, відібраного з проміжку між газопроводом та бетонним пригрузом з хімічними реагентами виявила лужну реакцію pH = 8,0...8,5;

 взаємодія середовища поблизу поверхні бетонного пригруза з хімічними реагентами виявила лужну реакцію pH = 8,5.

6. При проведенні рентгенографічного контролю стану металу труби було цілковито підтверджено результати попередніх досліджень та контролю, що добре видно з рис. 4.

За результатами проведених обстежень були зроблені наступні висновки.

Наявність білого нальоту (карбонатна плівка) на поверхні металу газопроводу під шаром ізоляції свідчить про наявність карбонатного середовища навколо газопроводу, яке виникло внаслідок довгострокового впливу бетонних привантажувачів на навколотрубне грунтове середовище. Про це свідчать результати електрометричних вимірювань та визначення pH ділянок навколо трубного грунтового середовища.

Карбонатна плівка має захисні властивості на дію грунтової корозії на метал, про що свідчить некородована поверхня металу. Але під час експлуатації метал газопроводу підлягає впливу циклічних навантажень, що сприяє розтріскуванню карбонатної плівки в поздовжньому напрямку та виникненню тріщиноподібних локальних анодних зон, які в свою чергу є осередком корозійного розтріскування.

Виникнення сходинкового нашарування поверхні металу труби та поздовжніх рисок у біляшовній зоні поздовжнього зварного шва пояснюється невідповідним розташуванням трубної заготовки в оправочному стенді під час проведення експандування на заводі-виробнику. Під час експлуатації газопроводу локальне сходинкове нашарування поверхні труби є осередком підвищених механічних напружень металу у кільцевому перетині газопроводу, позначення яких можуть



log dist.: 20259.80 m easting : 596063.4835 m northing : 48467.4706 m heighting : 260.5557 m wt : 15.00 mm o'clock : 07:09 event : metal loss-milling feature depth (11 %) length (454 mm) width; 14 mm) cluster : - comment : on long seam

Рис. 5. Критерії оцінки дефектів типу втрата металу

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 🚽

вийти за межі пружної зони металу, що підтверджується дослідженнями напруженого стану. Виявлені фактори стали причиною утворення тріщин на зовнішній поверхні газопроводу.

Більш детальну класифікацію утворення тріщини можливо виконати після проведення руйнівних методів контролю.

Потенційно-небезпечна дільниця магістрального газопроводу УПУ, що знаходиться на 3871,81 км, була відремонтована шляхом заміни дефектної ділянки на іншу, з використанням матеріалів, що відповідають вимогам СНиП 2.05.06–85.

Для подальшої безпечної експлуатації МГ були розроблені наступні заходи:

 в місцях розташування бетонних привантажувачів на дільницях газопроводу з труб Ду 1400 (балкові переходи, болотиста місцевість, скупчення води та ін.) постійно моніторити стан тіла труби газопроводу;

– в місцях з одночасною дією кількох несприятливих факторів проводити діагностування з метою виявлення поверхневих тріщин (дефектні труби замінити на стандартні згідно вимогам СНиП 2.05.06–85).

виконувати переізоляцію дільниць газопроводу з виявленими поверхневими тріщинами відповідно до вимог ДСТУ 4219.

– бетонні привантажувачі замінити на аналогічні, що виготовлені з іншого матеріалу, або анкерні.

– з урахуванням випадків невідповідності заявлених дефектів, виявлених ВТД до їх фактичних розмірів, приділяти особливу увагу на першочергове обстеження та ідентифікацію дефектів, розташованих біля поздовжніх швів на «гарячих» дільницях МГ.

Слід відзначити, що після згаданого випадку в ДК «Укртрансгаз» проведена велика робота в кількох напрямках, яка направлена на попередження подібних випадків в майбутньому. Це і робота, направлена на підняття загальної якості ВТД (більш жорсткі вимоги, створення робочої групи, сформованої з представників компанії та фірми-виконавця ВТД тощо), розширення обсягів виконання обстежень іншими методами діагностування. А також піднято на більш якісний рівень роботу з використання результатів діагностичних обстежень. Так, силами фахівців ДК «Укртрансгаз» (в тому числі філії НВЦ «Техдіагаз») розроблено «Положення про аналіз результатів ВТД МГ ДК «Укртрансгаз» та організацію ремонтних робіт з їх усунення» (далі – Положення), яке введено в дію наказом № 534 від 16.12.2009 р. Цей документ направлений на оптимізацію процесу ремонту МГ шляхом чіткого встановлення строків як оцінки результатів ВТД, так і формування планів з ремонту, визначення критеріїв вибору дефектів для ремонту, встановлення єдиного підходу до процесу, в тому числі і до планово-звітної документації, виконавчої документації тощо. Документ розроблено з врахуванням наявного досвіду організації роботи у філіях компанії і є складовою «живої» та ефективної системи забезпечення надійної експлуатації ГТС на основі ВТД – від планування та реалізації ВТД до аналізу результатів та адекватного реагування на них [3, 5].

Упускаючи іншу тематику згаданого Положення, зупинимось на частині, яка встановлює критерії вибору дефектів для ремонту з розподілом їх за черговістю виконання додаткового обстеження та/ або ремонту, що представлені в табл. 1.

Метою даної частини Положення є надати інженерам компанії інструментарій для виконання аналізу результатів ВТД. Він формувався, виходячи з умов забезпечення оперативного первинного аналізу результатів, відповідно встановлені чіткі критерії вибору дефектів за їх параметрами. Звичайно такий підхід є дещо консервативним, але вирішує поставлену задачу. Для більш детального аналізу слід проводити спеціалізовані розрахунки за чинними НД. Всі визначені параметри дефектів для ремонту визначені, виходячи з:

- аналізу існуючих НД;

 наявного досвіду експлуатації (ремонту, ДДК, аварії).

Так, для оцінки якості та обсягу виконаної роботи наведемо приклад щодо кількості проаналізованих НД для вибору критеріїв оцінки вм'ятин, що наведено в табл. 2.

Таблиця 1. Критерії вибору дефектів для ремонту після отримання результатів ВТД

Позиція	Опис дефекту	Параметри		
	Дефекти, що підлягають першоч	ерговому ремонту		
	Аномалії, які згідно розрахунків за ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008			
1	«Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення за-	<i>V</i> ридниций або ризниций		
1	лишкової міцності магістральних трубопроводів з дефекта-	критичний або значний		
	ми» віднесені до категорії:			
2	аномалії, для яких коефіцієнт ремонту ERF	$\ge 0,95$		
	аномалії, для яких умовний коефіцієнт згідно «Методики			
3	оцінки технічного стану труб газопроводу з тривалим стро-	\leq 1,05		
	ком експлуатації та його залишкового ресурсу» від 2002 р.			
4	дефект геометричної форми (аномалія внутрішнього ді-	Глибиною, рівною або більше ніж 3,5 % від <i>D</i>		
	аметру – вм'ятина)	3		

Продовження табл. 1.

Позиція	Опис дефекту	Параметри
5	втрата металу зовнішня, внутрішня або їх комбінація (корозія, заводська аномалія, будівельний дефект)	Глибиною, рівною або більше ніж 50 % Поздовжньо орієнтовані глибиною ≥ 10 % і розміщені вздовж поздовжнього шва (± 200 мм) з співвідношен- ням довжини до ширини (Д/Ш) ≥ 30 при ширині де- фекту $\leq 2h$ (h – товщина стінки МГ) Поперечно орієнтовані глибиною ≥ 10 % і розміщені вздовж кільцевого шва (± 200 мм) з співвідношенням ширини до довжини (Ш/Д) ≥ 30 при довжині дефекту $\leq 2h$ (h – товщина стінки МГ)
6	аномалія кільцевого шва	Глибиною \geq 50 % або довжиною по колу, що дорівнює або більше ніж $1/3\pi D_{_3}$
7	аномалія поздовжнього шва	Довжиною по осі шва, рівною чи більше, ніж $2\sqrt{D_3 h}$ (h – товщина стінки МГ)
8	гофри	Висотою хвилі, більшої товщини стінки
9	тріщина по тілу труби або у зварному шві	Усі дефекти
10	розшарування під кутом у навколошовній зоні, розша- рування з виходом на поверхню, розшарування з випу- ченням	Усі дефекти
11	дефекти, що підлягають ремонту та розміщені на потен-	Усі дефекти
	цино неоезпечних дільницях МІ І	*
	Дефекти, що підлягають ремонту (пол	передньому оостежению)
	Аномали, які згідно розрахунків за дстэ-ні в Б.2.5- 21.2008 «Магістральні трубопроволи Настанова Визна-	
12	чення залишкової мішності магістральних трубопроволів	Помірний
	з дефектами» віднесені до категорії:	
13	дефект геометричної форми (аномалія внутрішнього діа- метру), що примикає до зварного шва (100 мм) або розта- поданий на зварному щві	Усі дефекти
14	втрата металу зовнішня, внутрішня або їх комбінація (корозія, заводська аномалія, будівельний дефект)	Глибиною, рівною або більшою ніж 30 % Кількість дефектів глибиною \geq 20 % на одній секції більше 10 шт. Кількість дефектів глибиною \geq 10 %, розміщених вздовж поздовжнього шва (\pm 200 мм) на одній секції більше 5 шт. Поздовжньо розташовані дефекти глибиною \geq 10 % з співвідношенням довжини до ширини Д/Ш \geq 10 при ширині дефекту \leq 2 <i>h</i> (<i>h</i> – товщина стінки МГ) Поперечно орієнтовані дефекти глибиною \geq 10%, роз- міщені вздовж кільцевого шва (\pm 100 мм) з співвідно- шенням ширини до довжини (Ш/Д) \geq 10 при довжині дефекту \leq 2 <i>h</i> (<i>h</i> – товщина стінки МГ) Дефекти глибиною \geq 10 % в зоні поздовжнього шва (\pm 200 мм) на «гарячих» (30 км від КС) ділянках
15	розшарування у навколошовній зоні (100 мм)	Усі дефекти
16	аномалія кільцевого шва	Сумарною довжиною по колу, що дорівнює або більшою ніж $1/6 \pi D_3$, втрата металу глибиною більше або рівне 30 %
17	аномалія поздовжнього (спірального) шва	Один дефект довжиною по осі шва більше ніж 10 мм
18	гофри	Висотою хвилі більшою 0,5 товщини стінки
19	риска, подряпина, задир	Глибиною ≥ 10 %
20	недопустимі конструктивні елементи, з'єднувальні де- талі, що не відповідають вимогам НД	Усі дефекти
21	аномалія кільцевого шва – несуцільність площинного типу	Дефект глибиною ≥30 %
22	аномалія поздовжнього (спірального) шва	Дефект глибиною >30 %
Примітка	. До потенційно небезпечних дільниць МГ слід відносити ліль	ниці згідно п.V.1.11 Правил безпечної експлуатанії МГ +
надземні д	ільниці МГ, перетини з автомобільними дорогами та залізниц	ями, перетини з магістральними трубопроводами

фектів для обстеження/ремонту визначені, виходя- досить консервативний характер, але в умовах

Як уже згадувалось, ряд параметрів вибору де- чи з наявного досвіду експлуатації та іноді носять

Нормативний документ (стандарт)	Положення (півпериметру)	Вмятина по тілу труби	Вмятина на шві		
CSA Z662-03 (2005)	Верх	До 6 %D ₃	До 2 % <i>D</i> ₃ для <i>D</i> > 300 мм або до 6 мм		
	Низ	_//_	_//_		
AS288.5	Bepx	До 6 % D ₃	Не допускається		
(2001)	Низ	_//_	_//_		
ASME B31.8 (2003)	Bepx	До 6 % $D_{_3}$ або деформація < 6 %	До 2 % <i>D</i> ₃ або деформація < 4 % для в'язкого шва		
	Низ	_//_	_//_		
API 1160	Bepx	До 2 % <i>D</i> ₃ для <i>D</i> > 300 мм	Не допускається		
(2001)	Низ	до 6 % D ₃	Розрахунок/дослідження до 6 міс.		
PDAM (2003)	Bepx	1) до 7 % $D_{_3}$ 2) до 10 % $D_{_3}$ якщо є защемлення	Не передбачено		
(2003)	Низ	До 10 % $D_{_3}$ якщо є защемлення	Не допускається		
DOT Gas Rule (Part 192)	Bepx	 до 6 % D₃ (1 рік на реагування) більше 6 % D₃ і допустимий рівень деформацій (моніторинг) 	 до 2 % D₃ (1 рік на реагування) більше 2 % D₃ і допустимий рівень деформацій (моніторинг) 		
(2000)	Низ	2) більше 6 % <i>D</i> ₃ (моніторинг)	 до 2 % D₃ (1 рік на реагування) більше 2 % D₃ і допустимий рівень деформацій (моніторинг) 		
BGC/PS/P11	Bepx	До 12 % <i>D</i> ₃	Не допускається		
DOC/15/111	Низ	_//_	_//_		
RIETIENS	Bepx	До 12 % D ₃	Не допускається		
	Низ	_//_	_//_		
DOT Liquid rule (Part 195)** (2000)	Bepx	 до 6 % D₃ (негайне реагування) до 3 % D₃ (60 днів на реагування) до 2 % D₃ (180 днів на реагування) 	до 2 % <i>D</i> ₃ (180 днів на реагування)		
	Низ	До 6 % D ₃	До 2 % <i>D</i> ₃ (>180 днів на реагування)		
ВБН В.3.1-	Bepx	До 3,5 % D ₃	До 1 % <i>D</i> ₃		
00013741-7:2007	Низ	_//_	_//_		
Методика ВНІІГАЗ	Bepx	До 6 % D ₃	До 3 % D ₃		
(2007)	Низ	_//_	_//_		
Инструкция [7]	Bepx	Ло 3 % Д	По 2 % Д		
	Низ		$\mu_0 2 70 D_3$		

Таблиця 2. Вимоги НД щодо оцінки небезпеки вм'ятин за їх геометричними параметрами

надто високої ціни помилки, зокрема на експортних газопроводах ГТС України, є виправданою мірою. Всім відома проблематика обмежених можливостей внутрішньотрубних інспекційних снарядів в частині виявлення стрес-корозійного розтріскування. Маємо сумний досвід аварій, маємо досвід додаткового дефектоскопічного контролю (ДДК), де виявлені за фактом дефекти відрізнялись від характеристик, вказаних в звіті з ВТД. Як приклад, повторно, згадаємо дефект на МГ УПУ 3871,81 км (див. рис. 2), коли всупереч інформації в звіті з ВТД фактично було виявлено

стрес-корозійне розтріскування. З метою попередження ігнорування подібних дефектів нами було впроваджено такий критерій як «втрати металу зовнішні – поздовжньо орієнтовані глибиною ≥ 10 % і розміщені вздовж поздовжнього шва (±200 мм) з співвідношенням довжини до ширини (Д/Ш) ≥ 30 при ширині дефекту $\leq 2h$ (h – товщина стінки МГ)». З рис. 5 добре зрозуміло логіку встановлення такого критерію оцінки дефектів на трубах Ду–1400. (див. також табл. 1, поз. 5)

Слід відзначити, що описані критерії оцінки (черговість обстеження/ремонту) дефектів є скла-

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

довою системи комплексної оцінки технічного стану трубопроводу з визначенням рекомендацій щодо обсягів вибіркового чи капітального ремонтів за результатами оцінки:

 даних діагностичних обстежень металу трубопроводу;

 результатів дослідження фактичних фізико-механічних характеристик сталей;

 результатів комплексних обстежень протикорозійного захисту та корозійного стану об'єктів МГ (більш детально дану тематику буде описано далі);

- фактичної ситуації на місцевості тощо.

Загалом описану процедуру можна охарактеризувати як складову системи управління цілісністю трубопроводів (далі СУЦТ) [3], тому коротко зупинимось на вказаній тематиці СУЦТ.

Як відомо, діяльність будь-якого підприємства в кінцевому випадку повинна забезпечувати отримання прибутку, для чого слід максимально ефективно використовувати ресурси. Одним з шляхів оптимізації витрат є впровадження ефективної і гнучкої системи, де рішення про діагностичні, ремонтні, аварійно-відновлювальні заходи є взаємопов'язаними і узгоджуються на основі детального аналізу (в тому числі ризик-аналізу) [2, 3].

На сьогодні умовно можна виділити в Україні дві методології підходу до забезпечення надійної експлуатації трубопроводів:

<u>регламентна</u> – є чітко визначені нормативами періодичність, обсяги і засоби діагностичного контролю та методи ремонту. При цьому часто йде прив'язка не до реального технічного стану, а до терміну експлуатації МГ. Даний підхід суперечить здоровому інженерному глузду, коли подальші дії (ремонт, діагностика) повинні залежати від фактичного стану труби, моніторингу стану, статистики руйнувань тощо, а не від регламенту.

<u>універсальна</u> або так звана Система управління цілісністю трубопроводів (СУЦТ) – де, як уже наголошувалось, рішення є взаємопов'язаними і узгоджуються на основі детального аналізу (в тому числі ризик-аналізу).

Власне нумерація методологій загалом вказує на послідовність розвитку системи забезпечення цілісності МГ ДК «Укртрансгаз» – до сьогодні існувала і ще, можна сказати, певною мірою існує, чітко регламентована вимогами чинних нормативних документів та вимогами наглядових органів система, яка визначає обсяг, періодику діагностування та методи ремонту. Однак логічніше запобігати виникненню нештатних ситуацій шляхом усвідомленого системного підходу до забезпечення надійності роботи газотранспортної системи з визначеним рівнем ризику. Переймаючи прогресивний світовий досвід, в ДК «Укртрансгаз» впроваджується в експлуатацію СУЦТ, що базується на існуючій географічній інформаційній системі паспортизації і технічного моніторингу МГ та аналітичному програмно-апаратному комплексі, що розробляється. Враховуючи значну важливість, об'ємність та прогресивність даного питання, вважаємо, що більш детально розкривати згадану тематику взагалі та щодо програмно-аналітичного комплексу зокрема доцільно окремо.

- Довідник працівника газотранспортного підприємства / В. В. Розгонюк, А.А. Руднік, В.М. Коломєєв та ін. – Київ: РОСТОК, 2001. – 1090 с.
- 2. Розгонюк В. В. Трубопровідний транспорт природного газу. Київ: Кий, 2008. 304 с.
- Обслуговування і ремонт газопроводів / Грудз В. Я., Тимків Д. Ф., Михалків В. Б., Костів В. В. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 711 с.
- СТП 320.30019801.066л–2000. Магістральні газопроводи. Внутрішньотрубне обстеження лінійної частини.
- СТП 320.30019801.052–2002. Магістральні газопроводи. Пропускання внутрішньотрубних засобів на дільниці газопроводу.
- ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами.
- Инструкция по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов. – М: Газпром, 2008.

In-pipe examination of pipe metal is an extremely important component of technical diagnostics of the main gas pipelines at SC "Ukrtransgas". The main objective of diagnostics is determination of the actual technical condition of gas pipeline and equipment, which is mounted on it, with subsequent repair of the detected defects to ensure reliable operation of the facility. Untimely performance of diagnostic and repair operations leads to higher failure rate and emergencies. This paper describes an interesting case of diagnostics and determination of the causes for initiation of longitudinal cracks on the pipe outer surface. Importance of timely and correct reaction to diagnostic results is shown, and experience of SC "Ukrtransgas" in taking measures on optimization of the processes of main gas pipeline repair by establishing precise terms both for assessment of in-pipe diagnostics results and for making repair plans, determination of criteria of defect selection for repair, and forming a common approach to the process, in particular – to technical documentation, is shown. Following advanced global experience, DC "Ukrtransgas" introduces into operation a system of pipeline integrity control that is based on currently available geographic information system of certification and technical monitoring of the main gas pipelines and analytical software-hardware complex that is under development.

K e y w o r d s : technical diagnostics, main gas pipeline, in-pipe diagnostics, system of gas pipeline integrity control.

Надійшла до редакції 10.12.2012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРКИ СТАЛИ СТАЛЬНЫХ ПРУТКОВ С ПОМОЩЬЮ КОЭРЦИТИМЕТРА «СИЛА»

А.Б. МАКСИМОВ

Гос. морской технологический ун-т. 98309, г. Керчь, ул.Орджоникидзе, 82. E-mail: Kmti@aironet.com.ua

Исследован вопрос контроля твердости метизов (болтов, гаек, шайб) магнитным способом с помощью структурного импульсного локального анализатора (СИЛА). В качестве материала исследования использовали болты и гайки M20×1,5 из стали 40Х и стали 35, а также пружинные шайбы из стали 65Г. Получены корреляционные уравнения зависимости твердости по Бринеллю от величины коэрцитивной силы. Показано, что коэффициент корреляции составляет 0,7...0,9. Установлена возможность разбраковки метизов по уровням прочности в соответствии с требованиями стандарта. Применение неразрушающего метода определения твердости позволяет проводить 100 %-ный поштучный контроль изделий вместо выборочного, применяемого в настоящее время. Это способствует выявлению некачественной продукции и уменьшению риска потребителя на 2–3 %. Библиогр. 7, рис. 3.

Ключевые слова: сталь, углеродный эквивалент, коэрцитивная сила, твердость, уравнение регрессии, коэффициент корреляции, структуроскоп

В практике работы предприятий, изготавливающих металлические конструкции, возникает вопрос идентификации проката по маркам сталей. Химический, электроискровой или метод сжигания довольно трудоемкие, так как требуют отбора проб и стационарного оборудования. В этой связи применение неразрушающего способа рассортировки металлопроката по маркам (классам) сталей является наиболее приемлемым в полевых условиях [1].

Цель настоящей работы – проанализировать влияние геометрического фактора и химического состава на величину коэрцитивной силы для возможности идентификации сортового проката (прутка) по маркам сталей.

Для решения поставленной задачи использовали магнитный метод неразрушающего контроля (НК). Первичным информативным параметром являлась величина коэрцитивной силы металла, которую определяли с помощью магнитного феррозондового прибора СИЛА (структуроскоп импульсный локальный автономный).

В качестве материала исследования использовали сортовой прокат диаметром 6...16 мм и более из углеродистых и низколегированных марок сталей в горячекатаном состоянии.

Значение коэрцитивной силы зависит от геометрических параметров и химического состава исследуемой стали [2].

В качестве геометрического параметра использовали диаметр прутка, а химический состав (марку стали) оценивали по величине углеродного эквивалента, рассчитанного по формуле [3]:

$$C_{_{9}} = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + + Cu/13 + V/14 + P/2,$$
(1)

© А.Б. Максимов, 2013

где C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V и P – процентное содержание химических элементов в стали по стандарту.

Значения углеродного эквивалента исследуемых марок сталей по ГОСТ 1050-74: сталь 10 – 0,16...0,25; сталь 20 – 0,26...0,40; сталь 30 – 0,40...0,53; сталь 35 – 0,45...0,58; сталь 40 – 0,50...0,63; сталь 50 – 0,61...0,73; по ГОСТ 380 –71: Ст3сп – 0,27...0,39; по ГОСТ 19282-73: 14Г2 – 0,38...0,51; по ГОСТ 4543-74: 40ХС – 0,60...0,80; по ГОСТ 1435-74: У7 – 0,73...0,82.

На рис. 1 приведены результаты исследования влияния диаметра прутка на величину коэрцитивной силы ряда марок сталей. Видно, что с увеличением диаметра прутка значение коэрцитивной силы снижается. При диаметрах прутка свыше 14...16 мм коэрцитивная сила стабилизируется на определенном уровне в зависимости от марки стали. Для конструкционных марок сталей (сталь10,



Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы от диаметра прутка для марок сталей: 1 -сталь 40Х; 2 -сталь 40; 3 -сталь 35; 4 -сталь 20; 5 -сталь 3 сп; 6 -сталь 10

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

сталь 20, сталь 35, сталь Ст3сп, сталь 40, сталь 40X) зависимость между значениями коэрцитивной силы H_c и диаметром прутка D от 6 до 14 мм может быть выражена в виде:

$$H_c = AD^n + B, \tag{2}$$

где A и n – коэффициенты, зависящие от формы изделия (цилиндрическая) и диаметра, причем n < 0; D – диаметр прутка; B – постоянная, зависящая от марки стали (коэрцитивная сила H_c^0 , соответствующая определенной марке стали при диаметре прутка более 16 мм).

Значения *В* для ряда сталей следующие: для стали10 – 100 А/м; Ст3сп – 180; стали 20 – 230; стали 35 – 600; стали 40 – 800; стали 40Х – 1000.

С помощью программы «Excel» на ПК обработан массив значений коэрцитивной силы и диаметра прутка для каждой марки стали. Так, для стали Ст3сп уравнение (2) имеет вид:

$$H_c = 223 D^{-0,412} + 180.$$
(3)

В результате обработки экспериментальных значений углеродного эквивалента и соответствующих значений коэрцитивной силы для прутков диаметром более 16 мм получено уравнение регрессии:

$$H_{c}^{0} = 97,8C_{2} + 90. \tag{4}$$

На рис.2 представлено уравнение (4) в графическом виде. Из графика видно, что с увеличением углеродного эквивалента коэрцитивная сила возрастает.

Необходимо отметить, что линейная экстраполяция при значении углеродного эквивалента, близком к нулю (это соответствует технически чистому железу–армко–железу коэрцитивная сила равна 70...80 А/м [4]. Таким образом, свободный член в уравнении (4) соответствует с определенной точностью значению коэрцитивной силы армко-железа.

Между твердостью и коэрцитивной силой существует корреляционная связь, выражающаяся линейным уравнением регрессии [5].

На рис. 3 представлена зависимость твердости по Бринеллю (НВ) от коэрцитивной силы H_c для стали Ст3сп диаметром более 16 мм (в этом случае исключено влияние геометрического фактора).



Уравнение регрессии имеет вид:

$$HB = 0,315 H_c^0 + 82.$$
 (5)

Физический смысл свободного члена в уравнении (2) означает, что минимальная твердость (армко-железа) равна НВ82. Это значение твердости соответствует твердости по Бринеллю для армко-железа.

Согласно уравнению Петча–Холла связь между пределом текучести $\sigma_{\rm T}$ и размером зерна *d* имеет вид [6]:

$$\sigma_{\rm T} = \sigma_0 + K_{\nu} d^{-1/2}, \qquad (6)$$

где σ_0 – напряжение необходимое для перемещения дислокаций внутри зерна; K_y – величина, определяющая возможность передачи деформации от зерна зерну.

Между пределом текучести и твердостью по Бринеллю существует прямо пропорциональная зависимость вида:

$$\sigma_{\rm T} = c {\rm HB}, \tag{7}$$

где с – коэффициент пропорциональности.

В общем случае для любой марки стали при диаметре прутка более 16 мм (исключено влияние диаметра) коэрцитивную силу можно представить в виде двух слагаемых:

$$H_{\rm c}^0 = a {\rm C}_{\rm y} + \gamma, \qquad (8)$$

где *a*, *γ* – постоянные значения для данной марки стали, причем *γ* численно равно коэрцитивной силе армко-железа.

Уравнение (5) для любой марки стали можно представить в виде:

$$HB = mH_c + (HB)_0, \tag{9}$$

где *m* – постоянный коэффициент для всех исследуемых марок сталей, равный 0,315; (HB)₀ – значение твердости по Бринеллю для армко-железа.

Из сопоставления уравнений (5) – (7) следует:

$$H_{\rm c} = \frac{K_{\rm y}}{C_{\rm g}m} / \sqrt{d}.$$
 (10)

Для стали Ст3сп уравнение (10) будет иметь вид (*c* = 1,46: *m* = 0,315):



-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

$$H_{\rm c} = \frac{2,17K_y}{\sqrt{d}}.$$
 (11)

Тот факт, что коэрцитивная сила обратно пропорциональна диаметру зерна, согласуется с данными работы [7].

В уравнении (2) коэффициент *В* согласно уравнению (7) будет равен ($aC_3 + \gamma$). Тогда уравнение (2) примет вид:

$$H_{c} = AD^{n} + aC_{2} + \gamma. \tag{12}$$

Для исследуемых марок сталей в диапазоне толщин 6...14 мм уравнение (3) с учетом уравнения (4) будет:

$$H_{\rm c} = 223D^{-0.42} + 97,8a{\rm C}_3 + 90.$$
 (13)

Таким образом, уравнение (13) учитывает форму образца (цилиндрическую), его диаметр и химический состав (углеродный эквивалент). Свободный член показывает, что это сплав на основе железа.

По уравнению (13) можно построить тарировочные графики для каждой марки стали при различных диаметрах прутка. Определив коэрцитивную силу экспериментально и зная диаметр прутка, можно определить марку стали.

В результате полученных экспериментальных данных и их интерпретации следует, что значение коэрцитивной силы стали складывается из трех составляющих согласно уравнению (13). Первое слагаемое зависит от формы изделия (в нашем случае пруток имеет цилиндрическую форму) и диаметра прутка. Это слагаемое можно назвать геометрическим. Второе слагаемое зависит от углеродного эквивалента и определяет марку стали, поэтому оно может быть названо марочным. Третье равно коэрцитивной силе армко-железа и может быть определено как базовое (базовым элементом в стали является железо). Так как в данной работе исследовали стали в горячекатаном состоянии, то их микроструктура является ферритно-перлитной. Дисперсность ферритно-перлитной структуры зависит от химического состава и скорости охлаждения после горячей прокатки. Прутки диаметром 6...14 мм охлаждаются на воздухе со скоростью 3...5 °С/с, обеспечивая получение ферритно-перлитной структуры 5-6 балла (ГОСТ 5639-82). Согласно полученным экспериментальным данным для прутков диаметром

6...14 мм влияние на микроструктуру в основном связано с химическим составом и в меньшей степени с геометрическим фактором.

Количественные и качественные характеристики ферритно-перлитной структуры в нашем случае определяются в основном химическим составом стали. По-видимому, слагаемое $K_y d^{-1/2}$ в уравнении Петча–Холла (формула (6)) определяется химическим составом, поэтому логично, что коэрцитивная сила зависит от коэффициента K_y и диаметра зерна.

Предложенная методика определения марки стали хорошо зарекомендовала себя, но чем ближе значения углеродных эквивалентов сталей, например, в случае частичного наложения интервалов углеродных эквивалентов, тем меньше вероятность идентификации сталей. В этом случае необходимо использовать другие методы, в частности, химический или спектрографический.

Выводы

Получены уравнения регрессии по определению углеродного эквивалента по значениям коэрцитивной силы для прутков диаметром 6...14 мм.

Предложено рассматривать коэрцитивную силу стального проката состоящую из трех составляющих: базовой (коэрцитивной силы армко-железа), марочной (зависящий от химического состава стали) и геометрической (зависящей от формы и размеров).

- 1. Максимов А. Б. Определение механических свойств арматурной стали неразрушающим методом / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008.– №3.– С. 70–73.
- 2. Гаркунов Э. С. Контроль качества отпущенных изделий из среднеуглеродистой стали с использованием приставных электромагнитов // Дефектоскопия. 1987. №2.– С. 30–32.
- 3. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.
- 4. *Меськин В. С.* Основы легирования стали. М. Металлургия, 1959. – 360 с.
- 5. *Кузнецов И. А.*, *Царькова Т. П.* Магнитный контроль твердости деталей из стали 30ХЗМ // Дефектоскопия. 1982. №2 С. 29–33.
- Зуев Л. Б. Локализация пластического течения алюминия и соотношение Петча–Холла / Л. Б. Зуев, Н. В. Зариковская, М. А. Федосова. // Журн. технич. физики. – 2010. – Т.80. – Вып.9 – С. 68-74.
- Попов Б. Е. Теория и практика магнитной диагностики стальных металлоконструкций / Б. Е. Попов, В. Ф. Мужицкий, Г. Я. Безлюдько, В. М. Долинский, Е. А. Левин. Интернет ресурс: http://www.nio12.ru/pdf/article/MAGN_ Diagnostika.pdf

Hardness monitoring of wire products (bolts, nuts, washers) by magnetic technique using structure pulse local analyzer (SILA) was investigated. M20x1.5bolts and nuts from 40Kh steel and steel 35, as well as spring washers from steel 65G, were used as investigation material. Correlation equations of Brinell hardness dependence on coercive force magnitude were derived. It is shown that the correlation factor is equal to 0.7 - 0.9. Possibility of wire product sorting by strength levels in keeping with standard requirements is established. Application of non-destructive method of hardness determination allows performance of 100 % piece-by-piece control of items instead of currently applied random inspection. This promotes detection of low-quality products and reducing user risk by 2-3 %.

K e y w o r d s : technical diagnostics, main gas pipeline, in-pipe diagnostics, defect repair, system of pipeline integrity control

Поступила в редакцию 01.01.2013

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-213 ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ

В.М. ТОРОП, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. Е-mail: office@paton.kiev.ua Б.О. ЯХНО, НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, Пр-т Победы, 37. Е-mail: mmientu@kpi.kiev.ua

С целью определения зон дополнительного контроля основного металла и сварных соединений парогенераторов ПГВ-213 энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» выполнены расчеты на прочность при статических, циклических и сейсмических нагрузках. Построены конечно-элементные модели и с помощью коммерческого программного комплекса ABAQUS определено напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов парогенераторов ПГВ-213 при статических, циклических и сейсмических нагрузках. Оценка статической, циклической прочности и сейсмостойкости выполнена на основании требований ПНАЭ Г-7-002–86. Несмотря на выявленные локальные зоны превышения допускаемых напряжений в режиме нормальных условий эксплуатации парогенераторов энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» статическая, циклическая прочность и сейсмостойкость обеспечивается. Накопленное усталостное повреждение парогенератора за 30 лет эксплуатации составило 0,259, что значительно меньше 1 и определяет возможность его дальнейшей эксплуатации. Выявленные в результате выполненных расчетов на прочность потенциально опасные зоны максимальных растягивающих напряжений являются местами возможного возникновения дефектов и поэтому указанные зоны были рекомендованы службе контроля металла ОП «Ривненсая АЭС» для проведения дополнительного периодического контроля. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 8.

Ключевые слова: парогенератор ПГВ-213, статическая и циклическая прочность, сейсмостойкость

Большая часть потребляемой электрической энергии промышленностью Украины вырабатывается на энергоблоках атомных электростанций (АЭС), построенных еще в 1980-х годах. Назначенный проектный ресурс оборудования систем важных для безопасности (СВБ) АЭС составляет 30 лет. Одним из составляющих безопасной эксплуатации атомных энергоблоков в сверхпроектный период является мониторинг текущего технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса данного типа оборудования, оценка соответствия оборудования требованиям современной нормативной документации (НД), обоснование объемов, периодичности и методов контроля основного металла и сварных соединений оборудования СВБ АЭС.

В АЭС с реакторами типа ВВЭР (водо-водяных энергетических реакторов) важнейшим элементом первого контура реакторной установки является парогенератор. В нем за счет тепла, получаемого в реакторе, вырабатывается пар, который потом используется как рабочее тело турбины для производства электроэнергии.

Выполнение расчетов на прочность при статических, циклических и сейсмических нагрузках парогенераторов энергоблоков № 1, 2 ОП РАЭС (Отдельное предприятие «Ривненская АЭС») необходимо для обеспечения требований действующих НД при обосновании продления сроков эксплуатации оборудования в сверхпроектный период. Описание расчетной модели. На первом и втором энергоблоках ОП РАЭС с реакторами ВВЭР-440 установлены парогенераторы ПГВ-213 типов I и II, основные технические параметры которых приведены ниже.

Технические параметры парогенератора при номинальном режиме эксплуатации Расчетное давление (абсолютное). МПа

- по первому контуру	
- по второму контуру	5,5
Температура стенки корпуса, °С	
Давление генерируемого пара, МПа	4,6
Температура генерируемого пара, °С	258260
Температура питательной воды, °С	
- с включенным подогревателем высокого	
давления (ПВД)	
- с отключенным ПВД	164
Температура теплоносителя, °С	
- на входе в парогенератор	
- на выходе из парогенератора	
Давление со стороны теплоносителя	
первого контура, МПа	
Давление инспекторских гидравлическихиспыт	ганий, МПа
- по первому контуру	
- по второму контуру	
Температура воздуха в боксе, °С	60

Конструктивно (согласно инструкции по эксплуатации на парогенератор ПГВ-213, У 213-И-553) парогенераторы типа I и типа II идентичны, отличие их только в расположении коллекторов теплоносителя, люков лазов, штуцеров ДАПЭН (дополнительного аварийного питательного электронасоса) и длин подвесок.

-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Исходя из перечисленных выше отличий в типах парогенераторов и учитывая консервативный подход, для построения расчетной модели использованы следующие параметры:

 подвеска типа І длиной 9480 мм (консервативный подход при оценке сейсмостойкости парогенераторов);

 – расчетная модель содержит штуцер ДАПЭН как в днище, так и в обечайке парогенератора (консервативный подход при оценке статической прочности).

Влияние типа парогенератора в расчетной модели не рассматривается, так как основное отличие заключается в том, что коллекторы теплоносителя меняют свое положение относительно горизонтальной продольной оси зеркально, патрубок подачи питательной воды также зеркально меняет свое положение относительно горизонтальной поперечной оси парогенератора, люк-лаз перемещается с правого днища на левое.

В горизонтальном направлении парогенератор закреплен на уровне своего центра тяжести с помо-

щью четырех гидроамортизаторов, установленных под углом 45° к корпусу и 90° по отношению один к другому, воспринимающих сейсмические нагрузки и допускающих свободное перемещение парогенератора в любом направлении при температурных расширениях оборудования. Таким образом, при построении расчетной модели влияние гидроамортизаторов учитывается только при определении собственных частот и сейсмических напряжений.

В вертикальной плоскости парогенератор удерживается с помощью четырех подвесок, шарнирно соединенных в нижней части с опорой и в верхней части с закладными деталями в боксе парогенератора. Также к парогенератору присоединены тросовые ограничители, которые притягивают парогенератор к полу.

Расчетная геометрическая модель и граничные условия парогенератора созданы с учетом технической документации и изложенных выше допущений приведены на рис. 1. Механические свойства материалов парогенератора соответствуют НД [1]. Спектр ответа для максимального расчет-



Рис. 1 Модель парогенератора, граничные условия и прикладываемые нагрузки



Рис. 2. Результаты расчета НДС в парогенераторе

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

ного землетрясения (MP3) величиной 6 баллов приведен ниже:

<i>а</i> , м/с ²	1,6	2,8	6,3	6,3	2,8	1,6	1,6	2,4	2,4	1,1	0,68	0,56	0,56
<i>f</i> , Гц	0,5	3	4	6	7	12	15	17	20	22	24	28	32

В процессе эксплуатации парогенератор нагружен внутренним давлением, весовыми нагрузками и усилиями, возникающими от температурного расширения различных конструктивных элементов.

Согласно рекомендациям [1], приведенные напряжения (для заданной температуры) определяются как сумма мембранных и изгибных напряжений от механических нагрузок, воздействующих на конструкцию парогенератора. Напряжения, возникающие в результате температурного расширения, учитываются при расчете на циклическую прочность путем оценки напряженного состояния по размаху приведенных напряжений.

Основными несущими элементами являются корпус парогенератора и коллектор первого контура. Масса воды в парогенераторе при номинальном уровне и номинальной мощности составляет 33 т, масса воды в полностью заполненном парогенераторе – 62 т. В расчетной модели эта масса равномерно распределена по поверхности нижней части корпуса парогенератора.

Опоры парогенератора с помощью шарнирных подвесок крепятся к закладным балкам. Кроме того, парогенератор удерживают тросовые ограничители, притягивающие его к полу.

В местах присоединения подвесок к тягам был реализован шарнир – отпущена степень свободы – поворот относительно оси *x*, а в местах соединения тяг с нижней опорой и резьбовыми толрепами – отпущены степени свободы – повороты относительно осей *x*, *y*, *z*.

Кроме того, для патрубка коллектора пара и коллектора первого контура были созданы твердотельные расчетные модели, позволяющие более точно оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) в наиболее нагруженных местах парогенератора.

Результаты расчета. В результате упругопластического расчета на статическую прочность методом конечных элементов с применением коммерческого



Рис. 3. Распределение НДС вблизи патрубка корпуса парогенератора

комплекса ABAQUS (рис. 2-4) было установлено, что максимальные напряжения от механических нагрузок в корпусе парогенератора возникают в районе патрубков коллектора пара и коллектора первого контура. Результаты анализа выполнения условий статической прочности приведены в табл. 1, 2 для каждого из использованных в парогенераторе материалов. Приведенные максимальные напряжения по Мизесу превышают установленные в [1] допускаемые напряжения при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) и поэтому указанные на рис. 2-4 зоны максимальных растягивающих напряжений являются потенциально опасными местами возможного зарождения дефектов и эти зоны следует дополнительно контролировать средствами неразрушающего контроля. Однако следует отметить, что в режиме гидроиспытаний (ГИ) нарушения нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и аварийных ситуациях (АС), приведенные напряжения в этих областях не превышают допускаемые для соответствующих режимов.

Следует отметить, что при расчете на статическую прочность была также выявлена наиболее нагруженная область в районе сварного шва № 76. В этой области имеют взаимодействие материалы с разным коэффициентом температурного расширения. Для этой области был проведен термоупругопластический расчет от действия температурных нагрузок на твердотельной модели, результаты которого представлены на рис. 5–6.

Результаты расчета от действия механических нагрузок в зоне сварного шва № 76 представлены на рис. 6. Как видно из рис. 5, б и рис. 6 зоны концентрации максимальных напряжений от действия температуры и давления не совпадают. Размах температурных напряжений в зоне сварного шва № 76 составляет 196 МПа, а напряжений от действия дав-



Рис. 4. Результаты расчета НДС в коллекторе пара парогенератора

-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ления 57 МПа, что дает максимальный суммарный размах приведенных напряжений порядка 253 МПа (амплитудные напряжения 126,5 МПа).

Холодный и гарячий коллекторы первого контура в центральной части представляют собой толстостенные перфорированные цилиндры с внешним диаметром 1072 мм, толщиной стенки 136 мм и диаметром перфорирующих отверстий 13,2 мм (с учетом толщины теплообменных трубок).

В связи с тем, что распределение напряжений в коллекторе первого контура циклически симметрично, возможно рассмотрение в расчетной модели не целого цилиндра, а некоторой его части с применением соответствующих граничных условий. Так, при решении задачи с помощью объемных конеч-

Марка стали	Пиковые максимальные расчетные напряжения (по Мизесу), МПа	[σ] ₂ , МПа (при заданной температуре), °С	Условие статической прочности					
При нормальных условиях								
22К	209 (корпус парогенератора)	161 (300)	Не выполняется					
08X18H10T	120 (коллектор)	148 (300)	Выполняется					
20	147 (коллектор пара)	153 (300)	-					
20К	158 (подвески)	178 (150)	-					
30XMA	194 (тяги)	295 (150)	-					
3сп5	151 (нижние опоры)	177 (150)	-					
	При гидроиспытаниях второго контура							
22К	217 (корпус парогенератора)	222 (100)	Выполняется					
08X18H10T	76 (коллектор)	211 (150)	-					
20	175 (коллектор пара)	233 (150)	-					
20К	180 (подвески)	233 (150)	-					
30XMA	223 (тяги)	385 (150)	-					
3сп5	174 (нижние опоры)	231 (150)	-					
	При гидроиспытани	иях первого контура						
22К	208 (корпус парогенератора)	211 (150)	Выполняется					
08X18H10T	133 (коллектор)	211 (150)	-					
20	156 (коллектор пара)	233 (150)	-					
20К	120 (подвески)	233 (150)	-					
30XMA	123 (тяги)	385 (150)	-					
3сп5	92 (нижние опоры)	231 (150)	-					

Таблица 2. Результаты расчета при нарушении нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и аварийных ситуациях (AC)

Марка стали	Пиковые максимальные расчетные напряжения (по Мизесу), МПа	[σ] ₂ ^{HHyЭ} , МПа (при заданной темпе- ратуре), °С	[σ] ^{AC} , МПа (при заданной температуре), °С	Условие прочности при ННУЭ/АС
22К	211 (максимальные в эле- менте) 200 (средние по толщине стенки) (корпус парогенератора)	198 (300)	223 (300)	Не выполняется/ выполняется
08X18H10T	140 (коллектор)	178 (350)	200 (350)	Выполняется/вы- полняется
20	170 (коллектор пара)	189 (300)	212 (300)	-
20К	146 (подвески)	189 (300)	212 (300)	-
30XMA	177 (тяги)	338 (300)	380 (300)	-
3сп5	145 (нижние опоры)	168 (300)	189 (300)	-

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 5. Распределение температуры (a) и размах температурных напряжений (б) в зоне сварного шва № 76

ных элементов целесообразно рассматривать часть перфорированной стенки. Рассматривался режим гидроиспытаний, как наиболее опасный, при котором внутренее давление на стенку коллектора и давление внутри перфорирующих отверстий принималось равным 19,1 МПа, а наружное давление (на стенку коллектора) 4,6 МПа.

Результаты расчета приведены на рис. 7. Возникающие в перфорирующих отверстия напряжения характеризируются неоднородным распределением, что



Рис. 6. Размах напряжений в зоне сварного шва № 76 от действия внутреннего давления

свидетельствует о концентрации напряжений. При этом максимум напряжений убывает от внутренней поверхности стенки коллектора к внешней. И хотя максимальные напряжения не превышают предела текучести и допускаемых напряжений при гидроиспытаниях, указанные на рис. 7 зоны концентрации максимальных растягивающих напряжений следует принимать во внимание при проведении периодического неразрушающего контроля металла, который, как правило, проводится токовихревым методом.

При нормальных условиях эксплуатации в местах максимальных напряжений возникают небольшие пластические деформации, влияние которых на расчетный ресурс и повреждаемость парогенератора рассматривается в расчете на циклическую прочность.

При расчете на циклическую прочность было выделено несколько огибающих для режимов нарушения нормальных условий эксплуатации и аварийных ситуаций, а именно группа «Расчетные параметры», «Увеличение теплоотвода через второй контур», «Уменьшение расхода теплоносителя первого контура», «Гидроиспытания», «Уменьшение массы теплоносителя первого контура» и



Рис. 7. Распределение напряжений по обводу перфорирующего отверстия: *а* − эквивалентные напряжения по Мизесу; *б* − эпюры напряжений (*1* − внешняя поверхность; *2* − средняя; 3 − внутренняя; *4* − допускаемое напряжение при ГИ; *5* − предел текучести при *T* = 150 °C

Деталь парогенератора	Марка стали	Напряжения при MP3, MПа	Напряжения при НУЭ, МПа	Напряжения НУЭ+МРЗ, МПа	[σ] ₂ ^{сейсм} , МПа
Корпус ПГ, место крепления гидроамортизатора	22К	60	100	160	223
Подвеска ПГ	20К	40	100	140	212
Гиб трубопровода подачи питательной воды	20	60	30	90	212
Патрубок коллектора пара	22К	5	198	203	223
Соединение патрубка Ду 1100 с корпусом	22К	5	185	200	223
Соединение патрубка Ду 720 с корпусом	22К	15	161	176	223

Таблица 3. Абсолютные значения приведенных напряжений



Рис. 8. Зоны максимальных напряжений для различных материалов, которые являются потенциально опасными зонами возможного зарождения дефектов в парогенераторах ПГВ-213

проведена оценка накопленного усталостного повреждения парогенератора, в результате которого ожидаемое общее усталостное повреждение парогенератора составило 0,259.

Сейсмический расчет проводили с помощью линейно-спектрального метода. При расчете на сейсмическую прочность сейсмические нагрузки прикладывались одновременно в трех взаимно перпендикулярных направлениях и суммировались по правилу квадратного корня из сумм квадратов от каждого воздействия. Для каждого из направлений использовался обобщенный спектр ответа, приведенный выше. Для вертикальной составляющей использовался спектр ответа, умноженный на коэффициент (0.67 = 2/3). Максимальные сейсмические напряжения для максимального расчетного землетресения (MP3) возникают в области присоединения гидроамортизаторов и в подвесках парогенератора, а их абсолютные значения приведены в табл. 3, из которой следует, что сейсмостойкость парогенератора обеспечена.

По результатам анализа статической, циклической прочности и сейсмостойкости парогенераторов ПГВ-213 энергоблоков № 1, 2 ОП «Ривненская АЭС» на рис. 8 представлены зоны максимальных растягивающих напряжений, которые являются потенциально опасными местами возможного зарождения дефектов и эти зоны следует дополнительно контролировать средствами неразрушающего контроля как при оценке технического состояния, так и при проведении регламентных работ по периодическому контролю металла.

Выводы

Несмотря на некоторые локальные превышения допускаемых напряжений в режиме нормальных условий эксплуатации парогенераторов ПГВ-213 энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» статическая, циклическая прочность и сейсмостойкость обеспечивается.

Накопленное усталостное повреждение парогенераторов ПГВ-213 за 30 лет эксплуатации не превышает 0,259, что значительно меньше 1 и определяет возможность их дальнейшей эксплуатации.

Выявленные в результате выполненных расчетов на прочность и представленные на рис. 8 потенциально опасные зоны максимальных растягивающих напряжений, которые являются местами возможного возникновения дефектов, были рекомендованы службе контроля металла ОП «Ривненская АЭС» для проведения дополнительного периодического обследования.

ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоиздат, 1989.– 525 с.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

- Повышение безопасности и продление срока эксплуатации энергоблоков 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС». Итоговый отчет. – Киев: 2011. – 194 с.
- Григолюк Э. И., Фильштинский Л. А. Перфорированные пластины и оболочки. – М. : Наука, 1970.– 556 с.
- 4. Зарубин В. С., Станкевич И. В. Расчет теплонапряженных конструкций. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
- Зенкевич О. С. Метод конечных элементов в технике М.: Мир, 1975. – 542 с.

In order to determine the zones of additional monitoring of base metal and welded joints of steam generators PGV-213 of power units #1 and 2 of JC "Rivnenskaya NPP" strength analysis at static, cyclic and seismic loads was performed. Finite-element models were plotted and commercial software complex ABACUS was used to determine the stress-strain state of structural elements of steam generators PGV-213 at static, cyclic and seismic loads. Evaluation of static and cyclic strength and seismic resistance was performed on the basis of PNE G-7-002-86 requirements. Despite the revealed local zones of exceeding the admissible stresses in the mode of normal operation conditions of power units #1 and 2 of JC "Rivnenskaya NPP", the static, cyclic strength and seismic resistance is guaranteed. Accumulated fatigue damage of steam generators over 30 years of operation was equal to 0.259 that is much less that 1, and determines the possibility of its further operation. Potentially hazardous zones of maximum tensile stresses revealed as a result of performed calculations, are the locations of possible initiation of defects, and, therefore, the above zones were recommended for metal inspection service of JC "Rivnenskaya NPP" to conduct additional periodical control. 5 References.

Keywords: steam generator PGV-213, static and cyclic strength, seismic resistance

Поступила в редакцию 20.03.2013

18-я Сессия Научного совета по новым материалам

<u>16–17 мая 2013 г.</u> в Киеве в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины состоялась 18-я Сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук (МААН). Тематика сессии «Нанотехнологии и наноматериалы».

В заседании Научного совета приняли участие более 100 ученых и специалистов в области материаловедения от академий наук, вузов и предприятий Беларуси, России и Украины.

16 мая, в первый день работы Научного совета, прошли заседания секций «Полимерные материалы» и «Конструкционные и функциональные наноматериалы для медицины». На секциях были заслушаны и обсуждены научные доклады, в которых представлены результаты исследований, связанные с получением наноразмерных частиц, изучением их

взаимодействия со средой, формированием структур, изучением их свойств и созданием на этой базе нанотехнологий, которые позволяют получать материалы с уникальными характеристиками.

17 мая состоялось пленарное заседание Научного совета, которое открыл его председатель, президент МААН, президент НАН Украины, директор ИЭС им. Е.О. Патона академик Б.Е. Патон. Борис Евгеньевич напомнил, что в сентябре 2013 г. исполняется 20 лет со дня учреждения Международной ассоциации академий наук. За два десятилетия МААН стала авторитетной в СНГ и мире организацией. Она имеет официальные партнерские отношения с ЮНЕСКО, статус наблюдателя при Межпарламентской ассамблее СНГ. Инициативы МААН по развитию научного сотрудничества в СНГ в области фундаментальной и прикладной науки, по созданию в Содружестве общего научного пространства рассматривались на саммитах СНГ. Одно из важных направлений в деятельности МААН – взаимовыгодное сотрудничество ученых стран СНГ в области медицины.

При МААН создано 12 научных советов по отдельным проблемам и направлениям. Следует отметить, что первым, еще в 1995 г., был создан Научный совет по новым материалам.

Далее академик Б.Е. Патон ознакомил участников сессии с программой и регламентом работы пленарного заседания, на который было представлено 10 докладов.

В заключение работы сессии академик Б.Е. Патон сказал, что в сентябре 2013 г. планируется проведение юбилейной сессии МААН. В мире сейчас большое внимание уделяется развитию фундаментальных исследований в медицине. Для МААН, по-видимому, такие исследования тоже должны стать приоритетными. Необходимо сосредоточить усилия и средства на главных, наиболее важных направлениях, что позволит нам выйти на передовые позиции в мире хотя бы по некоторым направлениям. Б.Е. Патон поблагодарил докладчиков и участников сессии за плодотворную работу и пожелал им успехов в дальнейшей работе.

Участники сессии имели возможность в ходе дискуссии обменяться мнениями о прочитанных докладах, о состоянии работ в области разработки новых материалов в своих странах, оценить работу Научного совета по новым материалам, высказать пожелания по ее улучшению. Проводимые ежегодно Сессии Научного совета по новым материалам МААН позволяют сохранять и развивать творческие связи между учеными разных стран, способствуют интенсификации информационного обмена между ними.



ОСОБЕННОСТИ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЫШЛЕННОГО АЛЬПИНИЗМА. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМ РАБОТАМ

Ю.Н.БЛИНОВ

ООО НПО «Дискрет». 25006, г. Кировоград. ул. Дзержинского, 79/47. E-mail: npodiscret@gmail.com

Рассмотрены особенности обследования металлоконструкций высотных сооружений на примерах применения методов неразрушающего контроля и промышленного альпинизма. Показано, что большая часть высотных ответственных объектов эксплуатируется при наличии дефектов и повреждений, что является угрозой для окружающих. Установлено, что эксплуатируемые пролетные металлоконструкции (фермы и др.) имеют сверхнормативные прогибы и требуют корректировки проектных решений, частичного усиления или замены несущих конструкций. Проанализировано, что скрытая коррозия полых металлоконструкций (в том числе металлических дымовых труб и др.) достигает критических значений (22...74 %) и является одним из наиболее опасных и распространенных видов дефектов. Разработан собственный метод перемещения и безопасного доступа экспертов-верхолазов к дефектным узлам конструкций при их освидетельствовании, отличающийся от традиционных и зарубежных методов (снизу вверх). Применение лазерного оборудования для дистанционного определения сверхнормативных отклонений (прогибов) несущих металлоконструкций каркасов зданий в труднодоступных местах и последующая компьютерная обработка результатов измерений в графической среде позволяют перейти на качественно новый уровень обследований. По результатам инструментального обследования стволов металлических труб установлено, что наиболее опасными с точки зрения повреждения конструкций являются околошовные зоны царг и ходовых скоб. Библиогр. 3, табл. 2, рис. 11.

Ключевые слова: высотные сооружения, мобильный диагностический комплекс, промышленный альпинизм, пролетные металлоконструкции, сверхнормативные прогибы, скрытая коррозия, ремонтно-восстановительные работы

Обследование металлоконструкций высотных сооружений. Актуальная на данный момент проблема диагностирования высотных объектов и сооружений решается аттестованным персоналом научно-производственного объединения «Дискрет» с помощью методов неразрушаюшего контроля (НК), а также использования мобильного диагностического комплекса (рис. 1, *a*). Комплекс оснащен комплектом оборудования для НК, профессиональным верхолазным снаряжением для промышленного альпинизма, специальными средствами индивидуальной защиты в агрессивной среде, портативными радиостанциями, биноклями, длиннофокусной фото- и видеоаппаратурой, лазерным и геодезическим оборудованием, ноутбуком для обработки данных непосредственно на объекте с возможностью



Рис. 1. Обследование металлических конструкций спецсооружения с помощью мобильного диагностического комплекса методом промышленного альпинизма (*a*) и общий вид сооружения после окончания ремонтно-восстановительных работ (*б*) © Ю.Н.Блинов, 2013

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 2. Техническое обследование металлических конструкций с применением оборудования для НК: лазерного – при обследовании прогибов большепролетных ферм покрытия длиной 45000 м (*a*); ультразвукового (*б*); вихретокового (*в*)

выхода в Интернет, автономным электропитанием.

Нашей компанией разработан собственный метод перемещения и безопасного доступа экспертов-верхолазов к дефектным узлам конструкций при их освидетельствовании, отличающийся от традиционных и зарубежных методов (снизу вверх). Используемая методика промышленного альпинизма отличается мобильностью, компактностью и быстротой в организации рабочего места, когда нет возможности использовать традиционные средства. Применение лазерного оборудования для дистанционного определения сверхнормативных отклонений (прогибов) несущих металлоконструкций каркасов зданий в труднодоступных местах и последующая компьютерная обработка результатов измерений в графической среде, позволяют перейти на качественно новый уровень обследований, а в некоторых случаях обнаруживать грубые нарушения проектов, приводящие к ряду крупных дефектов, которые ранее не могли быть выявлены (рис. 2, а, б). Пример результатов измерений прогибов большепролетных ферм покрытия приведен в табл. 1.

Как видно из представленных в табл. 1 результатов, значения выявленных сверхнормативных

Таблица 1. Результаты геодезических измерений деформаций (прогибов) ферм покрытия: эпюры деформации (дефектные зоны (1-1) заштрихованы)



(недопустимых) деформаций (прогибов) металлических ферм покрытия составляют до 100 мм (!), что не удовлетворяет требованиям действующих нормативных документов [1].

В результате анализа выявленных дефектов и повреждений было установлено, что мероприятия по их устранению можно разделить на следующие две группы: *первая* – мероприятия по ликвидации мест коррозии металлоконструкций, в комплекс которых входят работы по очистке мест коррозии от загрязнений, ржавчины и пыли, обезжиривание поверхностей перед окраской; *вторая* – мероприятия, которые необходимо разработать для устранения деформаций несущих конструкций с привлечением специализированных организаций (при деформировании элементов металлоконструкций необходимо восстановить их в проектное положение или заменить).

К числу наиболее характерных дефектов и повреждений металлоконструкций покрытия зданий и мероприятиях по их усилению относятся дефекты монтажа (рис. 3), сверхнормативные прогибы конструкций (рис. 4), потери сечения конструкций вследствие коррозии (рис. 5), механические деформации элементов конструкций (рис. 6) и др. Все обнаруженные во время обследования отклонения от проектных решений подлежат регистра-



Рис. 3. Дефект монтажа: смещение элементов вертикальных связей в узловой фасонке; отсутствие проектных болтов соединения (1–2) – 3 шт. вместо пяти (предаварийное состояние)

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 4. Сверхнормативный прогиб прогона горизонтальных связей (1-3) составляет 93 мм (обозначен пунктиром)



Рис. 5. Местные утонения металла стенок вертикальных связей из замкнутого коробчатого профиля вследствие внутренней коррозии (1–4) (потеря сечения от проектного значения 22 %)

ции и нанесению на карты дефектов, являющихся неотъемлемой частью технических отчетов и экспертных заключений. На рис. 7 представлен пример оформления карты дефектов.

В связи с выявлением при обследовании сооружений сверхнормативных отклонений (прогибов) несущих пролетных металлоконструкций, а также в связи с превышением действующих снеговых нагрузок над расчетными, согласно данным [1],



Рис. 6. Механические деформации (погнутости) элементов горизонтальных связей по нижним поясам стропильных ферм покрытия (1-5)



Рис. 7. Пример оформления карты дефектов с обозначением мест их обнаружения и шифров дефектов (1–1, 1–5)

выполняются инженерные поверочные расчеты и проектирование *усиления* поврежденных конструкций [2], а также ведутся авторский и технический надзор за строительством. На рис. 8, *а* представлен пример проектного решения по усилению большепролетных металлических ферм [3]. После выполнения усиления (рис. 8, *в*) до повторного ввода в эксплуатацию каждый вид конструкций принимается техническим надзором заказчика с участием представителя НПО «Дискрет».



Рис. 8. Усиление дефектных металлических стропильных ферм покрытия пролетом 45000 м: *а* – проектное решение по усилению конструкций; *б* – общий вид до усиления; *в* – во время усиления

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

Наиболее характерные критически опасные дефекты и повреждения конструкций металлических дымовых труб диаметром 800 мм. По результатам инструментального обследования установлено, что наиболее опасными с точки зрения повреждения конструкций ствола являются околошовные зоны царг и ходовых скоб. Практически во всех зонах термического влияния швов выяв-



Рис. 9. Сквозное разрушение металла царг ствола в околошовной зоне (1–6): вид трубы изнутри (*a*); определение остаточной толщины металла стенок (δ , *в*). Коррозионный износ 62 % (аварийно-опасное состояние)

лены сквозные коррозионные разрушения ствола и утонения основного металла околошовной зоны до толщины 1,7 мм (при проектной толщине 10 мм).

Измерения толщины элементов, поврежденных коррозией, выполняли с помощью штангенциркуля, а в недоступних местах и элементах замкнутого сечения ультразвуковым толщиномером УТ-31М, не меньше чем в трех сечениях по длине элемента (рис. 9). Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2. Пример оформления карты контроля по результатам испытаний по ультразвуковой диагностике ствола трубы.





Рис. 10. Последовательность ремонтно-восстановительных работ аварийной металлической дымовой трубы диаметром 0,8 м, высотой 30 м



Рис. 11. Ремонтно-восстановительные работы спецсооружения: сквозное коррозионное разрушение стенок полых конструкций (1–7) (*a*); замена поврежденных элементов (*б*); нанесение защитного покрытия агрегатами безвоздушного распыления (*в*)

Рекомендации по ликвидации последствий поврежденных металлических конструкций и ремонтно-восстановительным работам

После утверждения рекомендованных мероприятий по исправлению дефектных конструкций высотных зданий и ответственных сооружений строительное подразделение в составе НПО «Дискрет» выполняет ремонтно-восстановительные работы (рис. 10, 11), что позволяет максимально сократить сроки между обнаружением и ликвидацией дефектов. Этому пособствует многократное использование в разрабатываемых нами комплексных проектах производства работ (ППР) собственных технологий, конструкторских разработок [2–4], новейших технологических решений и материалов.

Выводы

Анализ данных, полученных нами в ходе экспертных обследований дефектных металлоконструкций ряда ответственных высотных сооружений, показал, что большая их часть эксплуатируется при наличии дефектов и повреждений [4]. При этом скрытая коррозия полых металлических конструкций с уменьшением площади проектного сечения несущих элементов на 2274 % является одним из наиболее опасных и распространенных видов дефектов.

Качественного восстановления металлических конструкций можно достичь за счет их очистки от коррозии и остатков защитного покрытия комбинированным способом (в сочетании термического и абразивного), а также нанесения новых покрытий агрегатами безвоздушного распыления.

Экспериментально установлено, что пролетные конструкции покрытий (фермы, прогоны, балки и т.д.) имеют сверхнормативные прогибы и требуют

корректировки проектных решений, частичного усиления или замены несущих элементов.

Применение лазерного оборудования и последующая компьютерная обработка результатов полученных измерений прогибов в графической среде позволяет перейти на качественно новый уровень обследований а в ряде случаев обнаруживать грубые нарушения проекта, приводящие к ряду крупных дефектов, которые ранее не могли быть выявлены.

Отсутствие своевременного контроля эксплуатирующими организациями за состоянием собственных высотных металлических сооружений (в том числе методом ультразвуковой толщинометрии), является угрозой для окружающих, так как большинство таких объектов находится в жилой и промышленной зонах городов. Своевременное выявление, демонтаж и оперативное восстановление аварийных конструкций указанных сооружений с помощью неразрушающих методов ультразвукового контроля и промышленного альпинизма являются актуальной задачей в Украине.

Систематизация данных НК, полученных экспертными организациями в ходе обследований, позволит в будущем перейти к техническому мониторингу высотных зданий и сооружений путем качественного прогнозирования остаточного ресурса состояния металлоконструкций.

- 1. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи.
- 2. *НПО «Дискрет»*. Проект усиления дефектных конструкций главного корпуса ТЭЦ №76/10-АС, КМ.
- Блинов Ю. Н. Особенности обследования технического состояния металлических конструкций высотных сооружений с помощью методов НК и промышленного альпинизма: Рекомендации по восстановительным работам// 7-я Нац. науч.-техн. конф. и выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика Ukr NDT-2012». 20–23 ноября 2012 г., Киев.

Features of examination of metal structures of high-rise buildings are considered in the cases of application of methods of nondestructive testing and industrial alpinism. It is shown that the majority of high-rise critical facilities operate in the presence of defects and damage that creates an environmental hazard. It is established that the operating span metal structures (trusses, etc.) have supernormative sagging, and require correction of design solutions, partial reinforcement or replacement of load-carrying structures. Analysis showed that latent corrosion of hollow metal structures (including metal chimneys) reaches critical values (22 - 74%) and is one of the most hazardous and common kinds of defects. A proprietary method was developed for movement and safe access of experts-steeplejacks to defective components of structures at their examination, differing from the traditional and foreign methods (bottom-up). Application of laser equipment for remote determination of supernormative deflections (sagging) of load-carrying metal structures of building frames in difficult-of-access places, and subsequent computer processing of measurement results in a graphical environment allow transition to a new examination level. By the results of instrumental examination of metal pipe bodies it was established that near-weld zones of side-bars and step irons are the most hazardous in terms of structure damage. 4 References, 2 Tables, 1 Figures.

K e y w o r d s : high-rise buildings, mobile diagnostic complex, industrial alpinism, span metal structures, supernormative sagging, repair-reconditioning operations.

Поступила в редакцию 22.03.2013

ЮБИЛЕЙНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

12 марта 2013 г. исполнилось 150 лет со дня рождения гениального ученого, выдающегося общественного деятеля и организатора науки, первого президента Украинской академии наук академика Владимира Ивановича Вернадского. В этот день состоялась юбилейная сессия Общего собрания Национальной академии наук Украины, посвященная чествованию В. И. Вернадского. На юбилейную сессию были приглашены высшие должностные лица государства и научная общественность.

Программа сессии включала вступительное слово президента НАН Украины академика НАН Украины Б. Е. Патона, доклад главы Комиссии НАН Украины по научному наследию академика В. И. Вернадского академика НАН Украины А. Г. Загороднего, выступление генерального директора Национальной библиотеки Украины им. В. И. Вернадского НАН Украины академика НАН Украины А. С. Онищенко, выступление директора Института общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского НАН Украины академика НАН Украины С. В. Волкова, а также вручение Золотых медалей им. В. И. Вернадского НАН Украины академику НАН Украины Н. В. Багрову и академику РАН Н. П. Лавёрову, телемост с антарктической станцией Украины им. В. И. Вер надского, премьеру видеофильма о жизни и деятельности академика В. И. Вернадского.



Владимир Иванович Вернадский — гениальный всемирно известный ученый, выдающийся общественный деятель, организатор и первый президент Украинской академии наук родился 12 марта1863 г. в Петербурге. Основательные знания Владимир Иванович получил на естественном

отделении физико-математического факультета Петербургского университета.

Владимир Иванович принадлежит к выдающимся фигурам XX столетия. Его всесторонняя деятельность оставила глубокий след в истории мировой науки. Академик В. И. Вернадский обогатил естественные науки глубокими идеями, которые стали основой для новых ведущих направлений в современной геологии, минералогии, гидрогеологии; обосновал ряд научных проблем, имеющих практическое значение.

Владимир Иванович — основоположник науки о биосфере и ноосфере, он основал всемирно известные школы минералогов и геохимиков, был первым исследователем основных биогеохимических закономерностей строения и состава Земли. Особое внимание уделял вопросам химического состава земной коры, атмосферы и гидросферы. Работы ученого послужили платформой для новых наук и научных направлений в геохимии, биогеохимии, космохимии, радиохимии, радиогеологии, гидрогеологии. Он является автором свыше 400 научных работ. С именем Владимира Ивановича Вернадского тесно связано основание Украинской академии наук. Он раскрыл весомое значение академической формы организации национальной науки в новых условиях, когда возрастало значение развития естественных наук для экономического прогресса государства и гуманитарных — для национального самоутверждения. Такой взгляд объективно был нацелен на утверждение Украины как независимого государства.

Владимир Иванович разработал концептуальные тезисы относительно создания академии как общенационального масштабного научного центра, мощного объединения государственных научных учреждений. Среди них: библиотека, архив, геологические учреждения, национальные музеи, институты для природоведческих и гуманитарных наук. При его непосредственном участии подготовлен первый проект Устава Украинской академии наук. Он же стал первым президентом академии. Благодаря В. И. Вернадскому уже на начальном этапе создания и функционирования Украинской академии наук был заложен мощный потенциал для дальнейшего развития академической науки в Украине. Начиная с 1973 г. в НАН Украины учреждена Премия им. В. И. Вернадского.

Владимир Иванович Вернадский был и навсегда останется в истории человечества гениальным ученым, не только человеком Земли и Космоса, а большим Сыном украинского народа, Человеком, чье имя навечно вписано в историю Национальной академии наук Украины.

Пресс-релиз

- ХРОНИКА

ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР ПО ПРИМЕНЕНИЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

14 и 15 февраля 2013 г. в лаборатории неразрушающего контроля ПАО «Укргидроэнерго» (г. Вышгород) состоялся практический семинар по применению современного УЗ дефектоскопа на фазированных решетках ЕРОСН-1000і для контроля сварных соединений и металла ответственного энергетического оборудования.

В семинаре, организованном ПАО «Укргидроэнерго», приняли участие сотрудники лаборатории НК этого предприятия, а также специалисты Трипольской ТЭС ПАО «Центрэнерго», Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, компании «Пергам» (Россия).

В ходе семинара на образцах сварных соединений энергетического оборудования были проверены на практике рекламируемые технические характеристики оборудования и его возможности относительно решения реальных производственных задач.

Дефектоскоп ЕРОСН-1000і совмещает все стандартные и «продвинутые» функции стандартного прибора для ручного УЗ контроля и системы, реализующей современную технологию УЗ контроля с фазированной антенной решеткой, когда в объект контроля излучается качающийся луч в плоскости падения УЗ волны. Кроме традиционянные, определяющие акустические и геометрические параметры контролируемого сварного соединения и используемого преобразователя.

Благодаря электронному формированию акустических пучков с различными углами ввода можно озучивать все сечение сварного шва из ограниченной зоны околошовной поверхности, что является важным фактором при контроле изделий с ограниченным доступом. В тоже время для обеспечения лучшей достоверности контроля оптимальным вариантом остается традиционное для ручного контроля продольно-поперечное сканирование.

На сегодняшний день лаборатория проводит техническое диагностирование ответственного оборудования на гидроэлектростанциях Днепровского и Днестровского каскада – Киевской, Каневской, Кременчугской, Днепродзержинской, Днепровской, Каховской ГЭС, а также Киевской и строяшейся одной из самых мошных в Европе Днестровской ГАЭС с применением методов НК. Благодаря всесторонней поддержке руководства компании «Укргидроэнерго» лаборатория НК продолжает развиваться. Это имеет воплощение в техническом перевооружении и освоении новых направлений работы. Среди последних до-



Руководитель лаборатории НК ПАО «Укргидроэнерго» В.С.Петренко (слева) и участники семинара



дефектоскопа



Испытание нового вихретокового Практический контроль образцов энергетического оборудования

ного А-скана на экран дефектоскопа выводится и S-скан (секторное сканирование), строящийся из нескольких А-сканов, соответствующих различным углам ввода луча.

Естественно, что для использования технологии фазированных решеток настройка прибора несколько усложняется, но в целом она аналогична стандартной процедуре, т.е. необходимо выставить законы распределения задержек между отдельными излучающими элементами ПЭП, провести коррекцию амплитуды в зависимости от расстояния до отражателей, задать диапазон углов прозвучивания, фокусное расстояние и выставить некоторые постостижений - приобретение и внедрение современного УЗ дефектоскопа на фазированных решетках EPOCH 1000i (производства фирмы OLYMPUS), который позволяет визуализировать различные виды дефектов. Еще один прибор, открывающий совершенно новое направление работы – георадар фирмы MALA. С его помощью будет проводиться контроль состояния земляных плотин и дамб.

Надеемся, что традицию проведения на своей базе практических семинаров, начало которой положили ПАО «Центрэнерго», Трипольская ТЭС и ПАО «Укргидроэнерго», поддержат и другие предприятия Украины.

А.Л. Шекеро







ІЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЕННОСТИ и новая выставка TechTest – ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И МЕХАНИЗМОВ.

12-я Международная выставка NDT Russia –

<u>26–28 марта 2013</u> в г. Москве на территории СК «Олимпийский» прошли 12-я Международная выставка NDT Russia – НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИ-КА В ПРОМЫШЕННОСТИ и новая выставка TechTest – ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И МЕХАНИЗМОВ.

Экспозиция выставок – это последние достижения, новейшие разработки, оборудование и технологии в области НК, испытаний и измерений, которые представлены как российскими производителями и разработчиками оборудования, так и представителями зарубежных компаний, дилерами, дистрибьюторами.

Ежегодно выставка NDT Russia проводится при официальной поддержке государственных структур и отраслевых ассоциаций. В этом году официальную поддержку выставке оказали: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»; Департамент науки, промышленной политики и предпринимательства Москвы; Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике; Ядерное общество России; ОАО «РЖД»; Департамент транспортного машиностроения Министерства промышленности и торговли РФ.

Церемонию открытия выставок почтили своим присутствием специальные гости:

- Бабушкин Всеволод Петрович, заместитель директора Департамента транспортного машиностроения Министерства промышленности и торговли РФ;
- Акопян Артур Георгиевич, заместитель начальника Департамента Технической политики ОАО «РЖД»;



- Клюев Сергей Владимирович, президент Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике;
- Кузелев Николай Ревокатович, вице-президент Ядерного общества России, вице президент Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике;
- Колесников Владимир Александрович, ректор Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева;
- Кудрявцев Владимир Николаевич, заведующий кафедрой технологии электрохимических производств Российского химико-технологического университета им. Д.И.Менделеева;
- Любина Ирина Анатольевна, генеральный директор ООО «Примэкспо»;
- Мангушева Римма Мидхадовна, руководитель проектов NDT Russia, TechTest, ExpoCoating.

Акопян Артур Георгиевич от имени ОАО «РЖД» поздравил участников и гостей с открытием выставки, отметил представительность экспозиции, а также тот факт, что системы НК имеют принципиальное значение для обеспечения требований безопасности работы железнодорожного транспорта и являются одним из ключевых элементов обеспечения безопасности цепочки перевозок.

Торжественное открытие с разрезанием красной ленты было передано почетным гостям выставки, Бабушкину Всеволоду Петровичу, Акопяну Артуру Георгиевичу, Колесникову Владимиру Александровичу, Любиной Ирине Анатольевне.

Участие в выставках приняли 163 компании из Германии, Канады, Китая, Чехии, России и Украи-



ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №2, 2013





ны, площадь выставки выросла на 10 % по сравнению с 2012 г. В этом году экспозиция выставки была особенно интересной, стенды компаний-участниц отличались не только обилием представленного оборудования – от приборов до сложных автоматизированных систем – но и внешним видом. Традиционно участники отмечают количество и качество профессиональных посетителей выставки, в этом году ее посетили 4299 специалиста.

Помимо интересной экспозиции для специалистов была организована насыщенная деловая программа, в ходе которой обсуждались актуальные вопросы промышленной безопасности. Так, в рамках выставки прошли семинары компаний-участниц:

- «Стационарные поточные системы компании Olympus для контроля качества труб при производстве», организатор: Пергам-Инжиниринг, ОАО.
- «Обзор современных решений и тенденций в НК от GE Inspection Technologies», организатор: *GE MEASUREMENT & CONTROL.*
- «Рентген 2013 современная цифровая и пленочная радиография», организатор: компания Yxlon.

Состоялся круглый стол «Интеллектуальные системы диагностики», организатор РОНКТД. Тема была выбрана в связи с работой коллективов ученых, разработчиков и эксплуатационных организаций над созданием технологической платформы «Интеллектуальные системы диагностики» – НТП «ИСД», обобщенного документа о состоянии и перспективах развития НК и ТД и выработке путей дальнейшего продвижения НК и ТД в России и на международной арене. Было заслушано 12 сообщений по различным аспектам в области НК и ТД. В мероприятии приняло участие более 50 специалистов.

При участии промышленной ассоциации «МЕГА» был проведен семинар по НК «МЕGATECH-NDT: современные приборы и технологии неразрушающего контроля». Программа семинара включала пять докладов, подготовленных представителями компаний «Мега Инжиниринг», «Регион-Спектрсерт», «Кропус», «Хилти», «ВНИГНИ». Посетители семинара имели возможность увидеть



оборудование в работе, познакомиться с его уникальными функциями и первоклассными техническими характеристиками.

НПА арматуростроителей провела в рамках выставки круглый стол «Испытательное оборудование и современные методы технической диагностики трубопроводной арматуры», в рамках которого технические специалисты заводов-производителей трубопроводной арматуры, испытательных лабораторий и эксплуатирующих предприятий обсудили вопросы, связанные с новыми перспективными технологиями и оборудованием для диагностирования, методиками и приборами неразрушающего контроля, мониторингом технического состояния и нормативно-методическим обеспечением контроля и диагностики оборудования, работающего под давлением (трубопроводная арматура, насосы, компрессоры).

Традиционно, участники выставки приняли участие в конкурсе «Инновация NDT».

Ежегодно вместе с выставкой растет и количество информационных партнеров, что способствует увеличению количества участников и посетителей вставки, а также укрепляет имидж выставки как главного отраслевого события. Среди наших партнеров – отраслевые и общепромышленные СМИ, порталы, ассоциации, такие как

«В мире НК», Diagnos-tika.ru, «Территория NDT», «Контроль. Диагностика», «Трубопроводный транспорт: теория и практика», Defektoskopist.ru, «Экспозиция.Нефть.Газ» «Газ России», «Мир измерений», «Нефтегазовая вертикаль», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» и др. Кроме того, выставка в который раз стала финальной площадкой для подведения итогов всероссийского профессионального конкурса дефектоскопистов, проводимого НУЦ «Качество» при поддержке РОНКТД среди профессионалов отрасли.

В день открытия выставки состоялся семинар на тему «Как повысить эффективность участия в выставках» в рамках образовательной программы для экспонентов, проводимой компанией «ПРИМЭКСПО». Цель семинара – помочь участникам грамотно организовывать работу на выставке, ведь от их профессионализма зависят не только результаты работы на конкретной выставке, но и развитие отрасли в целом в России. Для удобства обучающихся занятие было разделено на тематические блоки в соответствии с рассматриваемыми проблемами. В заключение встречи экспоненты получили практические советы по работе на выставках и смогли задать интересующие их вопросы ведущему занятия — генеральному директору Агентства выставочного консалтинга «ЭкспоЭффект» Николаю Карасеву. Высокий уровень выставки NDT Russia подтвержден знаками UFI – Всемирной ассоциации выставочной индустрии и РСВЯ – Российского союза выставок и ярмарок. Востребованность и актуальность деловой программы подтверждается хорошей посещаемостью мероприятий и высоким интересом докладчиков.

Приглашаем профессионалов отрасли принять участие в выставке следующего года, которая традиционно состоится в Москве, в СК Олимпийский, 18–20 февраля 2014 г.

Оргкомитет

Выставка «ДЕФЕКТОСКОПИЯ»

10-12 сентября 2013 г.

Иркутск

<u>С 10 по 12 сентября 2013</u> года впервые в Иркутске состоится XIV Международная специализированная выставка приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля «ДЕФЕКТОСКОПИЯ».

Выставка для профессионалов НК – впервые на Байкале!

Местом проведения выставки «Дефектоскопия-2013» выбран крупнейший промышленный центр России – г. Иркутск. В Иркутской области наибольшее развитие получили следующие отрасли: металлургия, машиностроение, химическая и нефтехимическая, топливная, горнодобывающая, лесная и деревообрабатывающая промышленность. К посещению выставки приглашены дефектоскописты – практики крупнейших промышленных предприятий региона.

Выставка представит полный спектр приборов и оборудования всех видов неразрушающего контроля для промышленности, строительства и транспорта. В рамках экспозиции будет работать контрольно-диагностический полигон («тестдрайв»), на котором участники продемонстрируют действие приборов неразрушающего контроля на реальных объектах непосредственно в выставочном павильоне. Также в рамках выставки пройдут семинары и круглые столы для специалистов по различным методам контроля.

ВЫСТАВКА «ДЕФЕКТОСКОПИЯ» – это мероприятие, ориентированное на практическое применение современных средств неразрушающего контроля и технической диагностики во всех отраслях промышленности, транспорта, строительства. Ежегодно выставка собирает более 60 ведущих компаний из России и зарубежных стран (Украины, Швеции, Германии, Франции, Швейцарии, Испании, Израиля). Мероприятие посещают свыше 1500 ециалистов-практиков.



Приглашаем вас посетить XIV Международную специализированную выставку приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля «ДЕФЕКТОСКОПИЯ».

Подробная информация на нашем сайте www.restec.ru/defectoscopy

ПОДПИСКА — 2013

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», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).





Подписка на электронную версию журнала «**Техническая диагностика и неразрушающий контроль**» на сайте: http://www.rucont.ru. По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf.

Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2011 гг. Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

• Первая страница обложки (190×190 мм)

• Вторая, третья и четвертая

страницы обложки (200×290 мм) • Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)

- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот АЗ (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрези 200×290 мм

Контакты:

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

• 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 СМҮК, разре-

шение 300 dpi Стоимость рекламы и оплата

• Цена договорная

 По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию РФ по официальному курсу • Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом

на рекламу

• Оплата в гривнях или рублях

• Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

 Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади

 Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)

• Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 23.05.2013. 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».

© Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2013

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.