

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосека (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосека

В.Л. Венгринович

Інститут прикладної фізики НАН Білорусі, Мінськ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського

НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш

Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу

Л.І. Муравський

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

З.Т. Назарчук

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

Г.І. Прокопенко

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова

НАН України, м. Київ

А.Г. Протасов

НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

В.Р. Скальський

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

В.М. Учанін

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

С.К. Фомічов

НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (044) 200-82-77, 205-23-90, 200-54-84

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 от 09.01.2001

Журнал входить до Переліку наукових фахових видань України затвердженого Міністерством освіти і науки України (Наказ № 996 від 11.07.2017 р.)

ЗМІСТ

Борис Євгенович Патон — почесний член IEEE! 3

Розробки Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона в галузі неруйнівного контролю 4

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ГОПКАЛО О.П., НЕХОТЯЩИЙ В.О., БЕЗЛЮДЬКО Г.Я., КУРАШ Ю.П., СОЛОМАХА Р.М. Діагностування пошкодженості аустенітної сталі AISI 304 при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили 12

МІЛЕНІН О.С., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О.А., РОЗИНКА Г.П., ПІВТОРАК Н.І. Прогнозування залишкової міцності трубопроводних елементів з виявленими корозійними дефектами на основі методу Монте-Карло 25

НЕДОСЕКА С.А., НЕДОСЕКА А.Я., ШЕВЦОВА М.А. Визначення пошкодженості склопластика методом АЕ сканування 31

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

НЕДОСЕКА А.Я., НЕДОСЕКА С.А., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А. Сучасні технології діагностування обладнання в теплоенергетичному комплексі 40

ГРУЗЕВИЧ А.В., ДЕРЕЧА Д.А. Дослідження експлуатаційної надійності труб нижньої радіаційної частини котлів ТПП-210А, після переходу на спалювання газового вугілля 45

СТАСЮК С.З. Аналіз поведінки зварного з'єднання різномірних сталей в конструкції технологічного трубопроводу риформінгу реакторного блоку 50

ПОТАП'ЄВСЬКИЙ А.Г., БОНДАРЕНКО Ю.К., ЛОГІНОВА Ю.В., АРТЮХ К.О. Аналіз ризиків на технічну безпеку джерел живлення та зварних конструкцій з використанням НК і ТД для виробництва 58

ХРОНІКА

Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі 66

Міжнародний промисловий Форум-2019 70

ІНФОРМАЦІЯ

Про скасування ДСТУ та проблеми використання нормативних документів при проведенні навчання та атестації фахівців з неруйнівного контролю 73

Неруйнівний контроль в Антарктиці 75

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU

L.M. Lobanov (Editor-in-Chief),

A.Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief)

V.O. Troitskiy (Deputy Editor-in-Chief)

Ie.O. Davydov, S.A. Nedoseka

V.L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk

K. Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii institute of physical chemistry
of the NAS of Ukraine, Kyiv

O.M. Karpash

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

L.I. Muravsky

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

Z.Th. Nazarchuk

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

G.I. Prokopenko

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics
of the NAS of Ukraine, Kyiv

A.G. Protasov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»

V.R. Skalskiy

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

V.O. Stryzhalo

G.S. Pisarenko Institute for Problems
of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv

V.M. Uchanin

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

S.K. Fomichov

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kasymyr Malevych Str.
Tel./Fax: (044) 200-82-77, 205-23-90, 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

CONTENT

Borys Evgenovych Paton — Honorary Member of IEEE 3
PWI developments in NDT field 4

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*GOPKALO O.P., NEKHOTIASHCHYI V.O., BEZLYUDKO G. Ya.,
KURASH Yu.P., SOLOMAKHA R.M.* Diagnosis of damage in
austenitic steel AISI 304 at mechanical loading by measure-
ments of coercive force 12
*MILENIN A.S., VELIKOIVANENKO E.A., ROZYNKA G.F.,
PIVTORAK N.I.* Prediction of residual strength of pipeline
elements with detected corrosion defects based on Monte-
Carlo method 25
NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A. Ya., SHEVTSOVA M.A.
Determination of fiberglass damage by the method
of AE scanning 31

INDUSTRIAL

*NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S.A., YAREMENKO M.A.,
OVSIENKO M.A.* Modern technologies for equipment
diagnosis in thermal power complex..... 40
GRUZEVICH A.V., DERECHA D.A. Investigation of
operational reliability of pipes of lower radiation part of
TPP-210A boilers after transition to gas coal combustion 45
STASYUK S.Z. Analysis of behaviour of dissimilar steel
welded joint in the structure of reforming process pipeline of
a reactor block 50
*POTAPIEVSKIY A.G., BONDARENKO Yu.K., LOGINOVA
Yu.V., ARTYUKH K.O.* Analysis of risks for technical safety
of power sources and welded structures with application of
NDT&TD for production 58

NEWS

NDT in the context of Ukraine's associate membership
of the European Union..... 66
International Industrial Forum-2019 70

INFORMATION

On cancellation of GOSTs and problem of application of
normative documents during training and certification of NDT
specialists 73
NDT in the Antarctic..... 75

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78

БОРИС ЄВГЕНОВИЧ ПАТОН — ПОЧЕСНИЙ ЧЛЕН IEEE!



Почесне членство в Інституті інженерів електротехніки та електроніки (IEEE) присуджується фізичній особі на все життя. Присуджується Радою директорів IEEE людям, які, не будучи членами IEEE, внесли видатний вклад в розвиток людства в сферах інтересів IEEE.



Секція IEEE України з гордістю повідомляє, що професор Борис Патон, президент Національної академії наук України, директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України обраний для отримання Почесного членства в IEEE 2020. Це визнає його досягнення в технічних галузях IEEE, що впливали на розвиток електрометалургії, матеріалознавства, електрозварювання металів та біологічних тканин.

В кінці поточного року на зборах ради директорів IEEE схвалено рішення по наданню проф. Борису Патону, президенту Національної академії наук України, директору Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України особливої нагороди — Почесного члена IEEE (Honorary Membership Award) з формулюванням «За досягнення в технічних галузях IEEE, що впливають на розвиток електрометалургії, матеріалознавства, електрозварювання металів та біологічних тканин».

Звання Honorary Member присуджується IEEE за вагомий внесок у розвиток технічних наук, визначених IEEE. Інститут інженерів електротехніки та електроніки налічує більше ніж 400 тис. членів з 160 країн світу, однак саме Honorary Members – не більше 50. Одержувачам цього звання вручають сертифікат, знак «Почесний член» та кришталеву статуетку.

В попередні роки одержувачами почесного членства IEEE були Теллі Уїтні (2019), Антон Цайлінгер (2018), Родольфо Стефано Зіч (2016), Елон Маск (2015), Ширлі Марі Тільгман (2014) та інші.

Dear Professor Paton,

It is a great pleasure to inform you that the IEEE Board of Directors selected you to receive the **2020 IEEE Honorary Membership Award**, which is given elected by the Board of Directors from among those individuals, not members of IEEE, who have rendered meritorious service to humanity in IEEE's designated fields of interest.

The award comes with the following citation:

"For lifetime achievements within IEEE technical fields of interest in the development of processes of electrometallurgy, materials science, electric welding of metals, and biological tissues."

For nearly a century, the IEEE Awards Program has paid tribute to researchers, inventors, innovators, and practitioners whose exceptional achievements and outstanding contributions have made a lasting impact on technology, society, and the engineering profession. Each year the IEEE Awards Board recommends a small number of outstanding individuals for IEEE's most prestigious honors. You now join this select group.

Details regarding the award presentation will be sent separately via electronic mail by the IEEE Awards Staff.

Congratulations on your achievement, and thank you for your commitment to IEEE and its mission of advancing technology to benefit humanity.

Very truly yours,

Jose' Moura
IEEE President

РАЗРАБОТКИ ИНСТИТУТА ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины является одним из ведущих научно-исследовательских центров в области создания неразъемных соединений и материаловедения. Создание новых конструкций, освоение новых материалов, технологий сварки, наплавки, пайки и др. технологий сопровождается разработкой технологий неразрушающего контроля (НК). Информация НК ложится в основу прочностных расчетов, определения остаточного ресурса и допустимости продолжения эксплуатации объекта (рис. 1). В ИЭС им. Е.О. Патона накоплен богатый многолетний опыт по использованию методов и средств НК качества материалов и сооружений практически для всех отраслей промышленности с применением всех основных методов НК (визуальный, радиационный, магнитопорошковый, капиллярный, ультразвуковой, термография и т. д.).

При участии ИЭС им. Е.О. Патона:

- подготовлены основные Постановления правительства и Президиума НАНУ, которые определили развитие научной и производственной базы НК в Украине;
- созданы в четырех вузах специализированные кафедры по НК;
- введена в Украине трехуровневая международная система аттестации специалистов НК;
- организована Международная академия наук по НК (Academia NDT International) со штаб-квартирой в г. Брешия (Италия);
- предложен переход от покิโลметровой к потрубной системе технического обслуживания магистральных трубопроводов с кодами, считываемыми устройствами для внутритрубного и наружного контроля.

Ниже приводятся примеры некоторых разработок ИЭС в области НК.

Созданы приборы для **оптоэлектронного визуально-измерительного контроля (ВИК)**. Наибо-

лее простым и самым распространенным методом НК является визуальный контроль, предшествующий всем остальным видам НК. По внешнему виду сварного шва можно дать общее представление о его качестве. Достоверность визуального НК во многом определяется человеческим фактором (утомляемость, внимательность и т. п.). В настоящее время для того, чтобы перепроверить или уточнить полученные результаты необходимо заново проводить визуальный контроль подозрительных участков сварного шва.

Для устранения этих недостатков созданы приборы цифрового визуального контроля, позволяющего считывать изображения сварного шва, измерять его геометрические параметры, осуществлять беспроводную передачу полученных изображений и запоминать их в цифровом виде. Полученные записи изображений сварных швов в дальнейшем обрабатываются, документируются и архивируются программой обработки изображений, определяется их класс в соответствии с ДСТУ ISO 5817.

Пример реализации оптоэлектронного визуального контроля на базе подвижного намагничивающего устройства типа ТВА показан на рис. 2. Прибор ВИК/ТВА-1 предназначен для объективной записи со скоростью до 3 м/мин. Здесь имеется подсветка 1, 2 околошовной зоны и два лазерных указателя ширины шва. Считывание изображения выполняется с помощью миниатюрной USB видеокамеры 3. В качестве монитора и регистратора используется смартфон 4. В полую ручку 5 прибора находятся аккумуляторы, обеспечивающие восемь часов непрерывной записи и трансляции информации по Wi-Fi. Прибор комплектуется кабелем 6, что позволяет наблюдать и записывать ВИК-информацию в недоступных для наблюдателя зонах на расстоянии до 5 м.



Рис. 1. НК металлоконструкции НСК «Олимпийский» выполнялся с участием ИЭС им. Е.О. Патона

Прибор предназначен для записи и последующего анализа результатов ВИК со скоростью порядка 3 м/мин. Преимуществом предлагаемого автоматизированного ВИК является простота его использования, достоверность полученной информации о всех внешних недостатках сварного шва. Снижается влияние человеческого фактора на результаты НК, возможность объективного сравнения качества швов с требованиями стандартов ISO-5817, ISO-6520.

Для ответственных объектов уже сегодня имеются все предпосылки для внедрения автоматизированного точного ВИК, который может комплектоваться различными оптическими измерительными устройствами, подтверждающими классность сварных швов, которая может быть В, С, D (ISO-5817) в зависимости от назначения и требований Заказчика.

Флэш-радиография использует твердотельные, электронно-оптические, сцинтилляционные рентгеновские преобразователи, обеспечивающие «мгновенное» считывание (флэш) рентгеновских изображений с последующей их цифровой обработкой. В отличие от пленочной радиографии результаты НК мгновенно получают на экране монитора, которые сохраняются на электронном носителе информации.

Разработанные мобильные рентгентелевизионные системы имеют размер рабочего поля

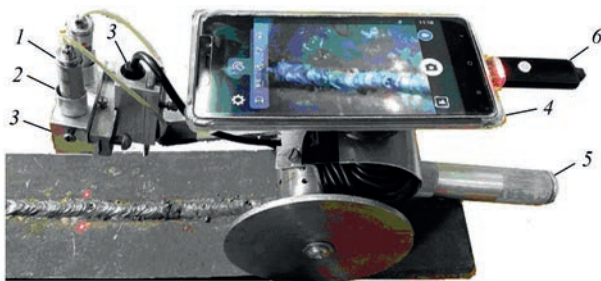


Рис. 2. Автоматизированная система ВИК на базе подвижного намагничивающего устройства типа ВИК/ТВА-1 (описание 1–6 см. в тексте)

120...200 мм, обеспечивают чувствительность контроля 0,8...1,0 % и разрешающую способность до 5 пар лин./мм (рис. 3).

X-ray mini технологии. Для радиационного контроля тонкостенных металлоконструкций и изделий часто используются миниатюрные недорогие твердотельные R-преобразователи типа S10811-11 японской фирмы Hamamatsu Photonics, с зоной контроля 24×34 мм и разрешающей способностью 25 мкм (рис. 4). При этом суммарная радиационная толщина контролируемых изделий, определяемая допустимым значением напряжения на рентгеновской трубке для данного типа рентгеновского преобразователя составляет 70 кВ. На этих энергиях изделия из алюминиевых сплавов просвечиваются толщиной до 4...5 мм, для стали – 2 мм. Подобные твердотельные миниатюрные R-преобразователи имеются других размеров и для других энергий. Подобные флюороскопические R-преобразователи, изготавливаемые ИЭС, содержат недорогие видеокамеры, применяемые в астрономии.

Сверхвысокая разрешающая способность твердотельных R-преобразователей позволяет выполнять 10...20-кратное цифровое увеличение полученного рентгеновского изображения на экране монитора без снижения его качества. Минимальный размер выявляемых дефектов 25...50 мкм.

Повысить разрешающую способность позволяет цифровая микрофокусная рентгеноскопия, в основе которой лежит применение источников рентгеновского излучения, фокусное пятно которых менее 0,1 мм. Микрофокусные аппараты позволяют выявлять в контролируемых объектах включения с очень тонкой структурой (например, проводники толщиной 15...25 мкм, детали детонаторов и др.). Основное преимущество микрофокусных излучателей – возможность получения изображений отдельных областей контролируемого объекта с большим геометрическим увеличением (2...10 раз)



Рис. 3. Рентгентелевизионный НК с помощью твердотельного миниатюрного R-преобразователя четырехниточного трубопровода на Киевском кислородном заводе (а) и рентгенограмма сварного соединения фрагмента трубы, просвеченной через две стенки (б)

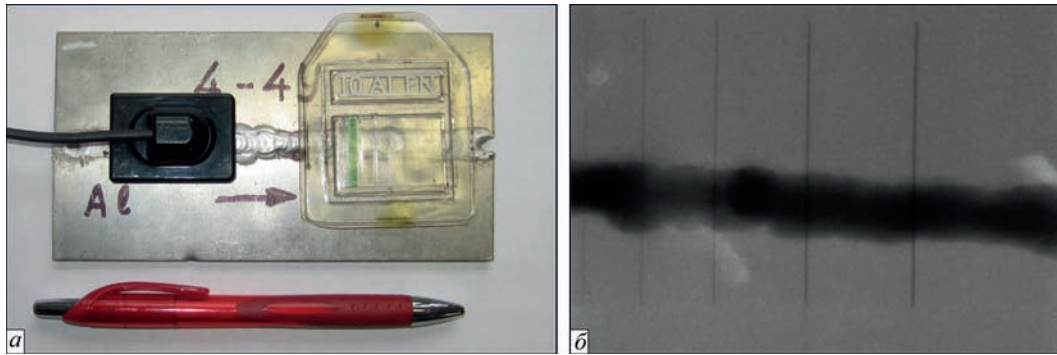


Рис. 4. Тангенциальный R-преобразователь (а) или ПЗС-матрица размерами 24×34 мм; б – результаты с экрана монитора без ухудшения качества изображения. Таким образом подозрительный дефектный участок, выявленный при контактном просвечивании, может быть детально обследован при повторном уже бесконтактном удаленном просвечивании с повышенной до 10-кратной разрешающей способностью.

Х-гау mini технологии в сочетании с микрофокусными излучателями успешно применяются в НК электронных плат, чипов, электронных элементов и других мелких предметов.

Для контроля протяженных объектов в ИЭС им. Е.О. Патона на основе мини-детектора S10811-11 был разработан недорогой прецизионный рентгентелевизионный сканер для изучения протяженных объектов. Для формирования увеличенной контролируемой рабочей зоны выполняется цифровое (программное) сшивание малоформатных изображений, небольшие участки рентгенограмм сшиваются в процессе электромеханического сканирования в единую рентгенограмму объекта.

В качестве электропривода рентгентелевизионного сканера (своеобразного робота) используют шаговый двигатель, линейные направляющие и прецизионные валы. Для программного управления приводом используются микроконтроллеры Arduino. Макет такого робота показан на рис. 5.

Результаты программного сшивания отдельных фрагментов рентгеновского изображения при сканировании контролируемого объекта приведены на рис. 6.

Предлагаемая технология контроля с использованием сканера по крайней мере на порядок де-

шевле известных в настоящее время технологий на основе крупноформатных цифровых панелей. Стоимость миниатюрного R-преобразователя, примененного для получения снимка по рис. 6, не превышает нескольких тыс. дол. США. Крупноформатный преобразователь таких размеров имеет стоимость до 50...100 тыс. дол. США. Разработанный по программе «Ресурс» сканер должен найти применение для R-контроля лопастей вертолетов, элементов оперения самолетов и других протяженных объектов.

Тангенциальное рентгеновское просвечивание, т. е. просвечивание по касательной к образующей тела вращения (рис. 7), позволяет определять остаточную толщину металла труб, (глубину коррозии/эрозии на внешней или внутренней поверхности стальных труб), зазоры между обшивкой и телом, без снятия внешней изоляции. В последнее время разработана цветовая селекция границ радиационного изображения стенок трубы и последующих наслоений, например, теплоизоляции, защитного кожуха и т. п. Точность определения толщины стенки для труб диаметром до 100 мм составляет $\pm 0,2$ мм. Эта уникальная технология внедрена при НК толстостенных труб из аустенитных сталей атомных электростанций Украины. Работа выполнена и сдана НАЭК Украины. Методика и оборудование для тангенциального просвечивания должны использоваться в тех случаях, когда УЗ-толщинометрия невозможна из-за большого затухания УЗ-колебаний.

Лазерная термография. В настоящее время термография широко используется для дистанционного обследования ответственных промышленных и гражданских объектов. При этом важно уметь дистанционно измерять размеры обнаруженных зон потери тепла и глубины поражения. В ИЭС созданы лазерно-термографические измерительные системы, которые позволяют определять дистанционно координаты и геометрические размеры зон повышенной потери тепла промышленных и гражданских объектов.

Комплекс прост в эксплуатации, может использоваться в атомной, химической и нефтехимической, нефтегазодобывающей промышленности для



Рис. 5. Действующий макет рентгентелевизионного сканера

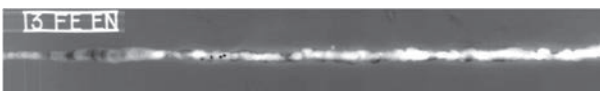


Рис. 6. Цифровая рентгенограмма сварного шва протяженностью 200 мм (35×200 мм), полученная с помощью шести экспозиций

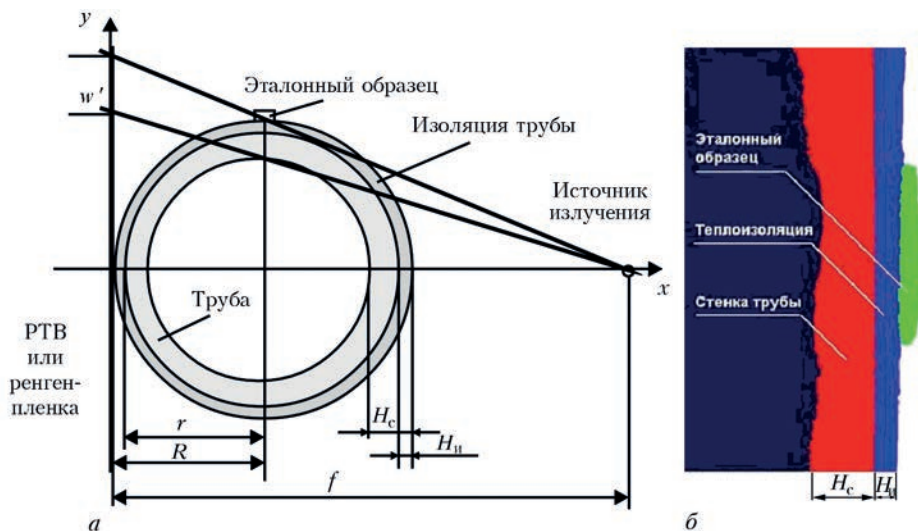


Рис. 7. Тангенциальное просвечивание трубы *a* – схема просвечивания; *б* – цветовая селекция результатов контроля толщины стенки трубы

объектов газотранспортной системы, электрических систем и машин, жилых зданий, домен, промышленных и гражданских сооружений (рис. 8).

Низкочастотный ультразвуковой контроль (НЧ УЗК) – один из проектов, выполненных ІЭС по программе «Ресурс», позволяет контролировать технологические трубопроводы и другие длинномерные конструкции без сканирования их поверхности. В его основу положен принцип анализа отраженных низкочастотных направленных волн,

способных распространяться на большие расстояния по телу закрытых объектов (теплотрассы, дтрубы для подачи топлива под взлетной полосой и т. п.). НЧ УЗК позволяет обнаруживать коррозионные поражения стенок трубы на расстоянии до 100 м. При этом доступ к трубе необходим только в месте установки акустической антенны. Обследование может выполняться в процессе эксплуатации труб при повышенных температурах без снятия изоляции.

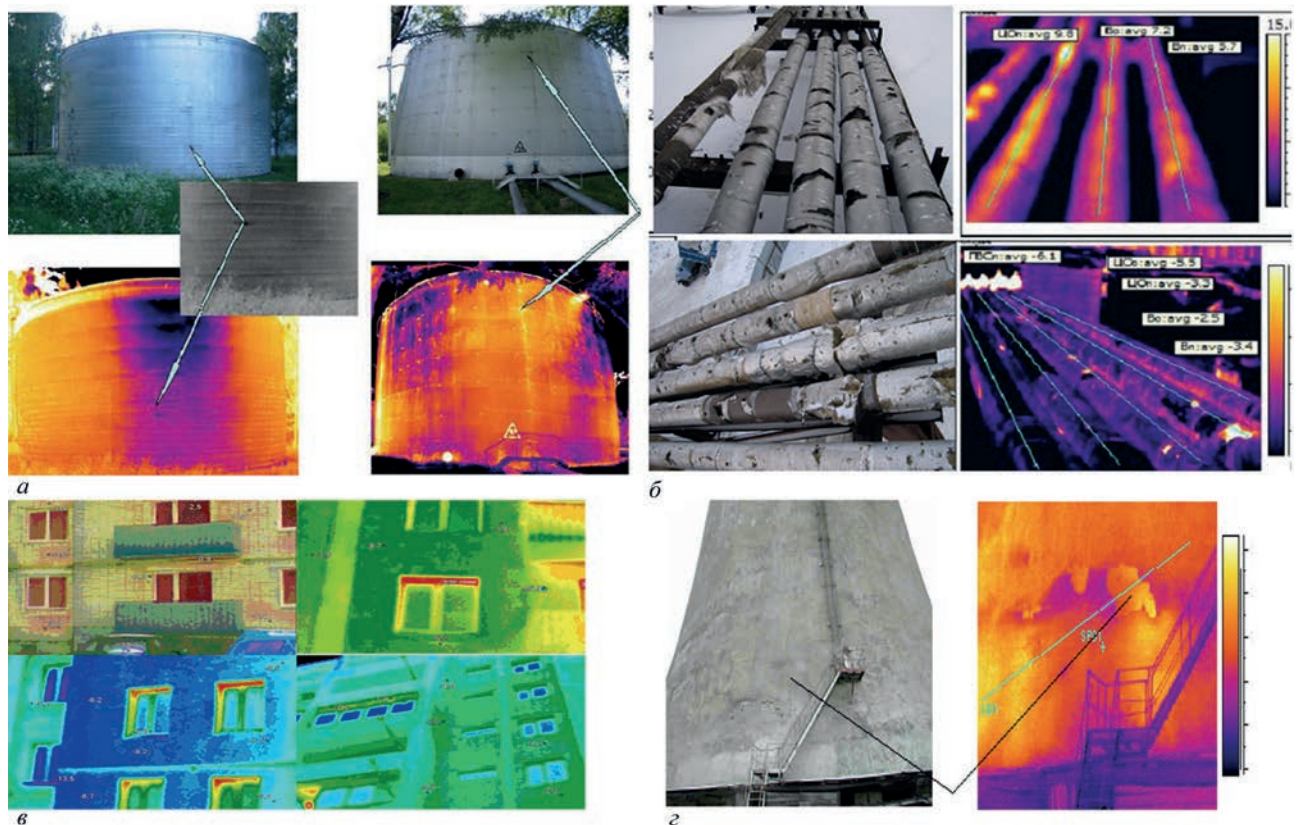


Рис. 8. Примеры термограмм контролируемых объектов: *a* – видимое и тепловое изображения резервуаров (стрелками обозначены минимальные участки, которые могут свидетельствовать о наличии дефектов); *б* – применение термографии для мониторинга состояния трубопроводных магистралей; *в* – термограммы жилых зданий, отдельные квартиры имеют повышенный расход тепла; *г* – видимое и тепловое изображения градирни ТЭЦ (стрелками указан участок нарушения сплошности внутренней футеровки)

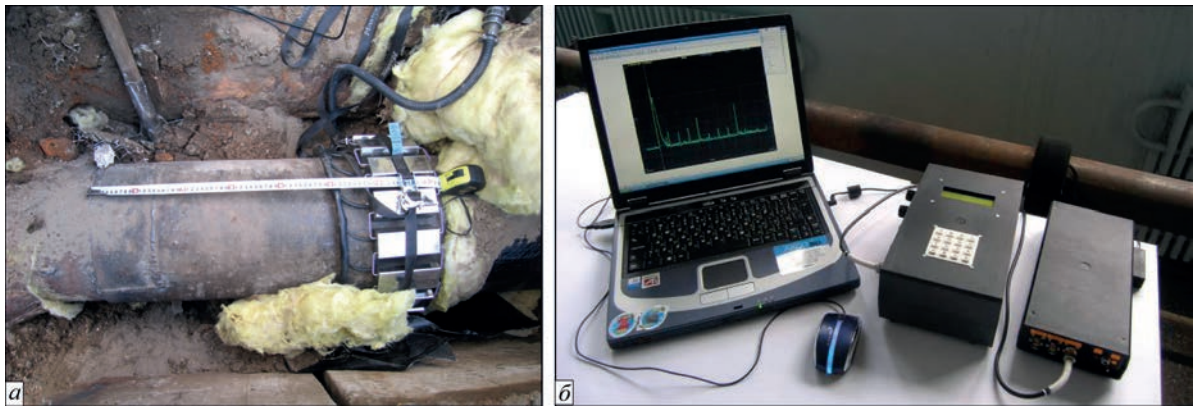


Рис. 9. Антенны дефектоскопов НЧ УЗК «Универсал-2П» 16 кГц (а) и «Универсал-1П» 36 кГц (б) на технологических трубопроводах диаметром 330 (а) и 154 мм (б)

Разработанные в ИЭС НЧ-дефектоскопы работают на частотах 16 и 36 кГц, предназначены для технологических трубопроводов диаметром от 54 до 330 мм (рис. 9). Они успешно применяются для НК теплотрасс и других протяженных объектов.

Технология оценки размеров трещиноподобных несплошностей, осуществляемая диф-

ракционно-временным ультразвуковым методом, разработанным и воплощенным в приборе ZIP-scan (Великобритания), распространенным под названием «Time of Flat Diffraction» (TOFD). Эта технология точного измерения внутренних трещин была освоена с институтами TWI (Великобритания) и Force (Дания). В ИЭС применяются ZIP-scan (Великобритания) и P-scan (Дания). Погрешность измерения размеров трещин составляет 1...2 мм в диапазоне толщин металла по методике TOFD составляет 10...50 мм. Традиционные амплитудные методы УЗК имеют значительно более высокие погрешности измерений. Периодическое использование оборудования для точного измерения трещиноподобных дефектов позволяет наблюдать за развитием внутренних трещин без прекращения эксплуатации ответственного объ-

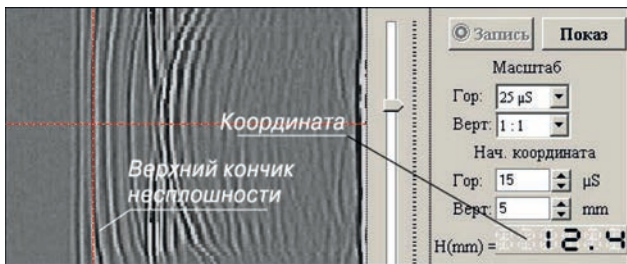


Рис. 10. Пример измерения в сварном соединении трещины методом TOFD

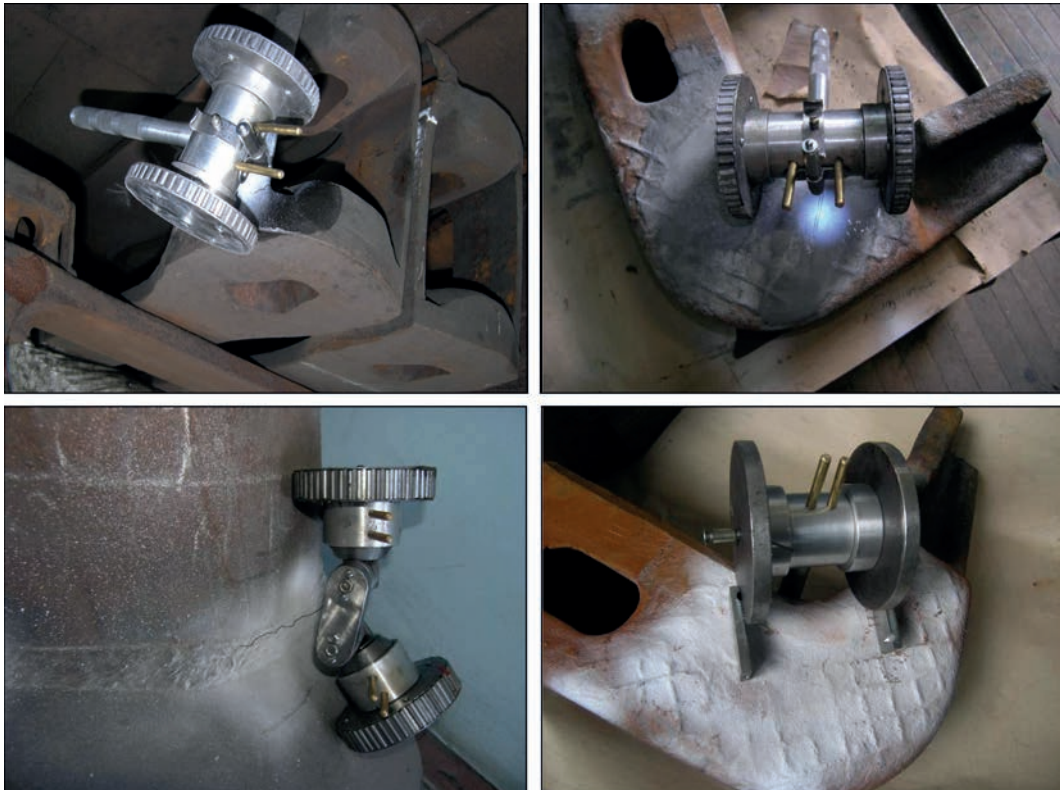


Рис. 11. Примеры применения подвижных намагничивающих устройств типа ТВА на железнодорожных металлоконструкциях

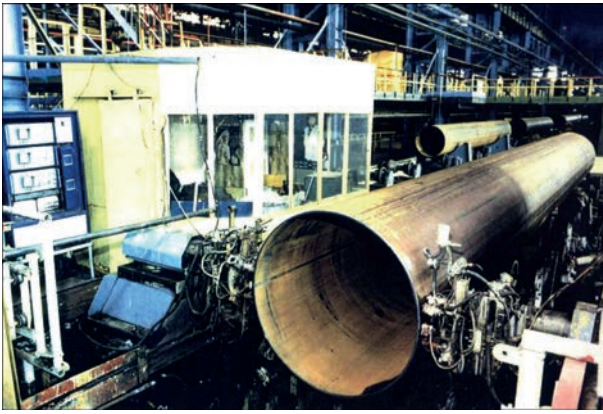


Рис. 12. Участок автоматизированного ультразвукового контроля труб на ХТЗ, оборудованный установкой НК-205

екта, в частности, трубопроводов АЭС. Такие работы проводились на Хмельницкой и Чернобыльской АЭС.

Технология TOFD дает на экране монитора подобные изображения (рис. 10) и используется на различных предприятиях Украины, в частности, на нефтеперерабатывающих заводах, магистральных трубопроводах, АЭС и др.

В ИЭС разработана **технология сканирующего локального намагничивания**, которая существенно расширила возможности применения магнитопорошковой дефектоскопии, обеспечила переход от традиционных способов однонаправленного намагничивания к разнонаправленному, т. е. к активному сканирующему поиску дефектов. В ИЭС выпущена серия таких намагничивающих устройств (НУ) под разные геометрические формы контролируемых объектов с широкими функциональными возможностями (рис. 11). Имеется большой практический опыт внедрения подвижных НУ для НК объектов железнодорожного транспорта (хребтовых балок, боковин тележек и др.). Эти результаты являются

достижениями украинской науки, обеспечивают обнаружение внешних и внутренних трещин на глубине до 20 мм, любой ориентации и опубликованы в ведущих изданиях США, Японии, России.

Ультразвуковой контроль зоны термического влияния сварного шва. В трубах магистральных трубопроводов имеется большое разнообразие происхождения дефектов. Они бывают приобретенные в процессе изготовления и эксплуатации. При изготовлении они могут быть в шве и в зоне термического влияния. Они могут происходить от несовершенства сварки или зоны разделки под сварку. Для снятия этих и подобных вопросов важна отдельная регистрация дефектов шва и зоны термического влияния при сварке труб для магистральных трубопроводов. Для выяснения происхождения дефектов разработана технология автоматизированного ультразвукового контроля (НК-205), показанная на рис. 12, которая внедрена на трубных заводах, включая Харьковский трубный завод.



Рис. 13. Стенд капиллярного контроля



Рис. 14. Старая и новая вентиляционные трубы (а) четвертого реактора ЧАЭС. Капиллярный контроль элементов каркаса новой вентиляционной трубы Чернобыльской АЭС (б)

Капиллярный контроль (КК). Разработаны новые технологические процедуры КК сварных соединений и литых изделий различных узлов машин, механизмов и промышленных объектов. КК может осуществляться цвето-контрастным или люминесцентным методами. Для выполнения КК создан передвижной стенд, оборудованный вытяжкой и средствами для эффективной оценки и контроля (рис. 13). Стенд изготавливается по индивидуальным заказам заводских ЦЗЛ и экспертно-технических организаций.

Использование этого недорогого стенда, содержащего большое количество вспомогательных средств, обеспечивающих надежное обнаружение мелких поверхностных трещин, удобно и при массовой диагностике объектов из любых материалов, для которых применяется КК, например, ультразвуковая очистка поверхности деталей.

На рис. 14 показан пример КК элементов каркаса новой вентиляционной трубы Чернобыльской АЭС, установленной над третьим и разрушенным четвертым реакторами. В каркасе этого сооружения было найдено много трещин, подлежащих ремонту.

Обследования резервуаров различного назначения для хранения нефтепродуктов, жидкого аммиака, спиртов и др. жидкостей (рис. 15) требует применения набора описанных выше разных методов НК.

Среди наиболее интересных практических применений методов НК за последнее время можно выделить следующие работы:

- техническое диагностирование резервуаров в Антарктике на украинской станции «Академик Вернадский» с применением оптоэлектронных приборов для ВИК;
- НЧ УЗК трубопроводов теплотрасс в г. Вишневом и в Институте химии высокомолекулярных соединений НАНУ;
- техническая диагностика трубных конструкций монумента «Родина-мать» Музея истории Украины во Второй мировой войне в г. Киеве;
- сравнительный рентгентелевизионный контроль пластин бронезилетов различных производителей;

- внедрение новых сцинтилляционных экранов для изготовления R-детекторов промышленной радиационной дефектоскопии;

- изготовление цифровых флюороскопических R-преобразователей на основе высокочувствительных астронометрических ПЗС-камер;

- создание и практическое применение для ВИК подвижных оптоэлектронных приборов для установления категории качества (В, С, D) сварных швов по ISO-5817;

- внедрение современных технологий НК на предприятиях черной металлургии, Укрзалізниці и для других отраслей промышленности.

Перспективные научные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона в области НК:

- разработка средств и технологий цифровой радиографии с использованием миниатюрных твердотельных радиационных преобразователей, микроконтроллеров, компьютерной техники и средств автоматизации, создание сканирующих R-систем;

- совершенствование УЗК с использованием цифровых методов обработки информации для воспроизведения размеров внутренних дефектов;

- разработка и внедрение сканирующих намагничивающих устройств для толщинометрии корпусов морских судов и поиска трещин в конструкциях железнодорожного транспорта;

- разработка и внедрение новых технологий и нормативно-методических документов в области теплового контроля объектов длительной эксплуатации;

- объединение результатов различных видов диагностики магистральных трубопроводов и переход от километровой к потрубой системе их учета;

- сочетание контактного и бесконтактного радиационного НК как возможность совершенствования технического обслуживания агрегатов аэрокосмической техники на основе X-ray mini R-технологии и компьютерной цифровой обработки изображений;

- разработка физических основ и технических средств, технологий ВИК металлоконструкций на основе лазеров, оптоэлектронных регистраторов с



Рис. 15. Резервуары жидкого азота и нефтепродуктов, которые периодически диагностируются

записью и обработкой объективной информации о качестве швов.

Стандартизация и профессиональная подготовка дефектоскопистов. ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ активно работает в Техническом комитете ТК-78, поддерживает деятельность Центра сертификации и Аттестационного центра НК, которые адаптируют к условиям Украины международные ISO стандарты по визуальному, магнитному, капиллярному, вихретоковому, тепловому, ультразвуковому, акустоэмиссионному и радиационному контролю. Для Украины важно внедрение международных стандартов и подготовка специалистов в соответствии с национальным (ДСТУ EN ISO 9712) и американским (ASNT SNT-TC-1A) стандартами. Это разные стандарты. Их объединяет стандарт УОНКТД (СТТУ УТНКТД 01-2013), который функционально шире, чем ISO 9712. СТТУ УТНКТД 01-2013 и касается следующих методов НК: ультразвуковой, радиационный, магнитный, капиллярный, вихретоковый, визуальный, контроль герметичности, акустико-эмиссионный, тепловой и вибродиагностический. По основным методам НК в ИЭС выпущены учебные пособия, издается бюллетень «НК-информ», журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Международное сотрудничество. Специалисты ИЭС сотрудничают с Европейской федерацией по неразрушающему контролю (EFNDT), с Международным комитетом по неразрушающему контролю (ICNDT), Международной академией неразрушающего контроля (ANDTI), с Международным обществом по мониторингу технического состояния (ISCM), Американским обществом по неразрушающему контролю (ASNT), с обществами НК Германии, Японии, Великобритании, Польши, Чехии, Болгарии, Хорватии, Италии, США, Кореи и рядом других стран, с Международной организацией ISO, комитетом ТК-135.

Специалисты ИЭС им. Е.О. Патона совместно с организациями из Великобритании, Италии, Испании, Германии, Греции, Болгарии, Бельгии успешно выполнили проект «SHIPINSPECTOR», посвященный выявлению опасных трещин и коррозионных поражений в корпусах судов на основе использования технологий низкочастотного УЗК и ультразвуковых фазированных решеток. Участвовали в выполнении Европейского научного проекта «INNOPIPES», посвященного выявлению коррозионных поражений трубопроводов и разработке новых композитных материалов для их ремонта (7-я рамочная программа ЕС).

Руководитель проф. Троицкий В.А. является членом Международной академии по НК, членом Американского общества по НК, почетным членом национальных обществ НК ряда европейских стран, членом редколлегий журналов «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Методы и приборы контроля качества» (Украина), «Территория NDT» (РФ), «INSIGHT» (Великобритания).

Результаты научных исследований ИЭС опубликованы в ведущих научных журналах Англии, Германии, Японии, США, Польши, РФ, Беларуси, докладывались на многих международных конференциях.

Признанием заслуг ИЭС им. Е.О. Патона в области НК является обучение специалистов из разных стран, желающих повысить свой уровень знаний в области НК. В ИЭС проходили стажировку по методам неразрушающего контроля специалисты из Грузии, Армении, Молдовы, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, Польши, Словении, Ирака и других стран.

Работы ИЭС в области НК отражены в следующих публикациях: Патон Б.Е., Троицкий В.А. (2013) Деятельность Института электросварки им. Е.О. Патона в области неразрушающего контроля и технической диагностики. *Территория NDT*, 3, 16–30.; Троицкий В.А. (2017) Радиационный контроль на основе твердотельных миниатюрных детекторов. *Там же*, 1, 30–34; Троицкий В.А., Глуховский В.Ю. (2014) Повышение эффективности телевизионной диагностики опасных и удаленных объектов. *Там же*, 3, 36–40; Троицкий В.А., Карманов М.Н., Горбик В.М. (2015) Опыт применения низкочастотного ультразвукового контроля для мониторинга состояния технологических трубопроводов. *Там же*, 1, 30–33; Троицкий В.А., Глуховский В.Ю. (2014) Определение геометрических параметров дефектов тепловизионным методом контроля. *7-я Международная конференция*. Ивано-Франковск; Троицкий В.А., Дядин В.П., Давыдов Е.А. (2010) Ультразвуковая диагностика эксплуатационных дефектов в конструкциях нефтегазового комплекса. *Автоматическая сварка*, 9, 45–50; Troitskiy V.A. (2015) Multidirectional Local Magnetization of Extended Metal Structures in Magnetic Particle Testing. *J. of Japanese Society for Non-destructive Inspection (JSNDI)*, 64, 2, 80–84; Troitskiy V.A. (2015) New Technology for Magnetic Particle Testing (MPT). *J. the NDT Technician ASNT. Tom Kervina*, 14, 1, 79–80; Troitskiy V.A. (2015) Devices for the Movable Local Multidirectional Magnetization of Metal Structures in Magnetic Particle Testing. *J. Materials Evaluation*, 73, 6, 675–683; Троицкий В.А. (2015) Разнонаправленное локальное намагничивание металлоконструкций при магнитопорошковом контроле. *Территория NDT*, 3, 56–61.

В.А.Троицкий, М.Н.Карманов, И.Я.Шевченко
Поступила в редакцию 16.07.2019

ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ AISI 304 ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ПО ВИМІРАХ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало¹, В.О. Нехотящий², Г.Я. Безлюдько³, Ю.П. Кураш¹, Р.М. Соломаха³

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150. м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³ТОВ «Спеціальні наукові розробки». 61184, м. Харків, а/с 12036, Україна

Приведені результати експериментальних досліджень можливості використання коерцитиметричного контролю для оцінки ступеню пошкодження металу при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. Показано, що відмінності у реагуванні коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних та аустенітних сталей полягають у відмінностях фізичної природи цих явищ. Для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при механічному навантаженні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до направленої). Реагування коерцитивної сили на механічні навантаження парамагнітної (у вихідному стані) нестабільної аустенітної сталі AISI 304 (08X18H9) пов'язано із структурними перетвореннями в процесі деформування вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит з кінцевим ферито-перлітним розпадом. Механічні навантаження обумовлюють зміну співвідношення феромагнітних та парамагнітних фаз металу, які викликають зростання значень коерцитивної сили до певної величини після чого при руйнуванні має місце зниження цих значень. Було встановлено, що зростання значень коерцитивної сили відповідає пружному та пружнопластичному деформуванню (стадії зародження тріщин), а зниження їх значень пов'язано з втратою суцільності металу при появі пор або тріщин (стадії розвитку тріщин). Для нестабільних аустенітних сталей по зміні напрямку кінетики коерцитивної сили в процесі навантаження з'являється можливість значно спростити визначення границі витривалості та встановлення стадій процесу накопичення пошкоджень з побудовою лінії незворотної пошкоджуваності (за Френчем). Коерцитиметричний моніторинг поверхні реальних конструкцій дозволяє визначати напрямок головних напружень і виявляти появу поверхневих та підповерхневих тріщин та оцінити рівень отриманих пошкоджень. Бібліогр. 18, рис. 18.

Ключові слова: структуроскоп, коерцитивна сила, навантаження, пошкодження, напруження, деформація, руйнування

Мета роботи. Мета роботи полягає у експериментальній перевірці можливості використання одного із методів неруйнівного контролю, а саме інструментального вимірювання змін значень коерцитивної сили в процесі механічного навантаження лабораторних зразків із аустенітної сталі для оцінки ступеня накопичених пошкоджень. Роботи останніх років в області магнітної структуроскопії дозволили встановити зв'язок магнітних і механічних властивостей ряду феромагнітних конструкційних сталей [1, 2]. В якості основного магнітного параметра була обрана коерцитивна сила (H_c , А/см), як найбільш чутлива до зміни щільності дислокаційної структури сталі [3] і пов'язана лінійною залежністю з механічними властивостями. В результаті діаграму розтягу стало можливим моделювати за даними зміни коерцитивної сили.

У зв'язку з встановленими суттєвими відмінностями реагування коерцитивної сили феромагнітних та парамагнітних сталей на механічні навантаження, які обумовлені відмінностями фізичної природи цих явищ, у даній роботі основну увагу приділено дослідженням нестабільної аустенітної

сталі AISI 304, для якої при навантаженні характерні більш високі максимальні значення коерцитивної сили, ніж для феромагнітних сталей, та відсутність впливу ефекту розвантаження на значення H_c [4–6]. Для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при механічному навантаженні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до направленої). При навантаженні цих сталей відбувається зростання значень коерцитивної сили, а при розвантаженні після дії напружень, які перевищували умовну межу плинності металу, відбувається поворот на 90° диполів та підвищення у 1,5...2,0 рази аналогічних значень H_c . Для парамагнітних (не магнітних у початковому стані) зміни значень коерцитивної сили при навантаженні пов'язані із структурними перетвореннями вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит з кінцевим ферито-перлітним розпадом, які викликають зміну магнітних властивостей металу з парамагнітного у феромагнітний стан. Слід зазначити, що оскільки механічні навантаження викликають еволюцію структури, яка обумовлює зміни значень коерцитивної сили, то останні зберігаються після роз-

О.П. Гопкало <https://orcid.org/0000-0001-7799-3870>

Ю.П. Кураш <https://orcid.org/0000-0003-3440-6351>

© О.П. Гопкало, В.О. Нехотящий, Г.Я. Безлюдько, Ю.П. Кураш, Р.М. Соломаха, 2019

вантаження. Дана обставина дозволяє проводити адаптування змін значень коерцитивної сили до накопичених пошкоджень у локальних зонах металу конструкцій в умовах експлуатації незалежно від наявності навантаження.

При циклічному навантаженні, крім цих перетворень відбувається утворення і накопичення мікропошкоджень у металі, які впливають на магнітні властивості та значення коерцитивної сили в тому числі. Використання коерцитивного контролю в умовах втомного навантаження дозволить проводити повноцінну діагностичну експертизу поточного стану елементів конструкції, а не суміш дефектоскопії з дефектометрією, як це має місце сьогодні [7].

Серед інших неруйнівних методів контролю коерцитиметрична оцінка пошкодження металу конструкцій з нестабільних аустенітних нержавіючих (спочатку немагнітних) сталей є досить перспективною. Згідно з отриманими в роботі [8] даними пластичне деформування аустенітної сталі збільшило значення коерцитивної сили в 10...30 разів і об'єму феромагнітної фази (α -Fe) в 15...150 разів відносно початкового стану. З чого випливає, що ступінь небезпеки допустимого деформування металу реальних конструкцій можна оцінювати за змінами коерцитивної сили з урахуванням її кінетики. Такої інформаційної чутливості до процесів деформування металу поки не виявлено іншими методами неруйнівного контролю.

Особливості накопичення пошкоджень при механічному навантаженні. При проектуванні металоконструкцій конструктори, як правило, припускають роботу металу у пружному діапазоні деформування та знижуючи при цьому дію експлуатаційних напружень різними за призначенням коефіцієнтами запасу. Але в наслідок наявності в окремих зонах конструкції концентраторів напружень різного походження в них виникають умови для малоциклового пружнопластичного деформування. Відомо [9, 10], що для діапазону малоциклової втоми характерно накопичення двох основних видів пошкоджень: малоциклового квазістатичного та малоциклового втомного руйнування. Квазістатичне руйнування, характерно для «м'якого» навантаження (контролі амплітуди напружень), відбувається внаслідок переважаючого процесу накопичення деформації циклічної повзучості до критичних значень, які приблизно відповідають значенню відносного подовження δ при розтязі з утворенням характерної «шийки». Руйнування від втоми, характерно для «жорсткого» навантаження (контролі амплітуди деформацій), відбувається в результаті зародження та розвитку до критичних значень тріщини втоми при відсутності накопичених деформацій.

Але характер закономірностей накопичення пошкоджень при «м'якому» та «жорсткому» наван-

таженні має суттєві відмінності. Якщо, наприклад, оцінювати ступінь накопичених пошкоджень металу при «м'якому» та «жорсткому» навантаженні відносним навантаженням (відношенням діючих максимальних напружень $\sigma_{0,2}^{\max}$ до циклічної умовної межі плинності $\sigma_{0,2}^{\text{цикл}}$), то кінетика процесу накопичення пошкоджень суттєво відрізняється (рис. 1). Для «м'якого» навантаження характерно монотонне зростання відносного навантаження при циклічному напруванні, а для «жорсткого» навантаження – характерна його стабільність.

В даний час при статичному і циклічному навантаженнях увесь процес накопичення пошкоджень за звичай поділяють на дві основні стадії: стадії зародження і стадії поширення тріщин, оскільки закономірності процесів пластичного деформування і руйнування при різних видах навантаження мають багато спільного [11–13].

У свою чергу стадія зародження тріщин включає в себе стадії статичної і циклічної мікроплинності, стадії статичної і циклічної плинності (з появою дефектів атомних масштабів і зародкових субмікротріщин з розмірами від тисячі ангстрем) і стадії деформаційного зміцнення з появою субмікротріщин розміром близько 1...2 мкм. При розтязі стадія зародження тріщин завершується досягненням максимального навантаження і початком шийкоутворення. При циклічному навантаженні стадія циклічного зміцнення (знеміцнення), завершується досягненням лінії незворотних пошкоджень (лінії Френча). Так само, як і при статичному деформуванні, на цій стадії поряд з процесами деформаційного зміцнення спостерігається розвиток пошкоджуваності у вигляді утворення субмікротріщин [14]. Стадію розвитку втомних тріщин зазвичай описують кінетичними діаграмами втомного руйнування (залежністю між швидкістю росту втомної тріщини і розмахом коефіцієнта інтенсивності напружень).

При розтязі і циклічному деформуванні розподіл напружень по перерізу виробів вельми нерівномірний через наявність шорсткості та концентрації напружень. При цьому пластичне деформування деталі теж дуже неоднорідне як по поверхні, так і по глибині і в умовах однорідного напруженого стану починається раніше, ніж в його серцевині [15]. Проведені експериментальні дослідження показали, наприклад [16], що в умовах однорідного напруженого стану, поверхневий шар в низько вуглецевій сталі, має межу плинності на 25 % нижче, ніж основний метал, а за деякими іншими даними [17], умовна межа плинності найтонших зразків складає всього 20 % величини для товстих зразків. При механічному навантаженні коли на поверхні проходить пластична течія, то серцевина знаходиться ще у пружному стані. Тому при циклічному навантаженні руйну-

вання, як правило, завжди починається в локальних зонах з поверхні.

В силу зазначених обставин при статичному та циклічному навантаженні поверхневі шари матеріалу починають раніше деформуватися і змінювати вихідну структуру металу, ніж основний метал, що викликає нерівномірність розподілу механічних та фізичних властивостей по поверхні та поперечному перетину виробів. При застосуванні неруйнівних методів контролю точність вимірювання характеристик фізичних властивостей матеріалу (наприклад, коерцитивної сили) в локальних поверхневих зонах буде залежати від габаритів датчика і глибини намагнічування металу. Тому при дослідженні механічних властивостей металів, наприклад, по зміні значень коерцитивної сили у найбільш пошкоджених локальних зонах поверхневих шарів, необхідно використовувати структуроскопи (коерцитиметри) з малогабаритними датчиками неглибокого намагнічування.

Методика експериментальних досліджень.

Об'єктом досліджень була полоса 40×5 мм, метал труб $\varnothing 76 \times 3$ і $\varnothing 159 \times 4$ мм з подовжнім зварним швом із аустенітної сталі AISI 304, італійського виготовлення у відповідності з європейським стандартом EN 10217-7.

Для випробувань використовували плоскі лабораторні зразки з розмірами робочої частини 120×14×4,5 мм, 150×14×3 мм, 28×14×3,6 мм та 28×14×5 мм. Випробування на розтяг і малоциклового втому при контролі амплітуди деформації («жорстке» навантаження) зразків проводили на модернізованій електрогідравлічній випробувальній машині 3201 UE-20 (СКБІМ, Росія) та INSTRON-8802 відповідно до ГОСТ 1497-84, 25.502-79 та ГОСТ 25.505-85. Випробування на багатоциклового втому проводили на резонансній випробувальній машині RUMUL TESTRONIC 50kN виробництва компанії RUSSENBERGER PRÜFMASCHINEN AG (Швейцарія). Випробування на циклічний вітнулевий розтяг зразків з частотою 2 цикла/хв проводили на важільній випробувальній машині ПП-4М (ЦНИИТМАШ, Росія). Всі згадані вище випробування проводили при кімнатній температурі.

Для вимірювання коерцитивної сили в лабораторних зразках при механічному навантаженні використовували структуроскоп КРМ-Ц-К2М (ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків) відповідно до стандартів ISO4301, ГОСТ 30415-96 та методичних вказівок РД ІКЦ «Кран» 07/97/02 (Росія), МВ 0.00-7.01-05 (Україна). В даній роботі для вимірювання значень коерцитивної сили використовували структуроскоп з різними датчиками, що відрізняються базою вимірювання та глибиною намагнічування: стандартний датчик D65 (база – 65 мм) з глибиною намагнічування до 30

мм, малобазний датчик D27 (база – 27 мм) з глибиною намагнічування до 4 мм і датчик зі зменшеною базою D12 (база – 12 мм) з глибиною намагнічування до 1 мм. Останній був розроблений і виготовлений за рекомендацією авторів, де базою вимірювання вважали відстань між зовнішніми краями наконечників полюсів магнітів.

Визначення значень коерцитивної сили на поверхні виробу або лабораторного зразка полягає у намагніченні металу до насичення, його розмагнічуванні з послідовним намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень H_c . Тривалість циклу визначення значень коерцитивної сили складає 10 с. При цьому зміна напрямку орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні впливає на величину коерцитивної сили. Слід нагадати, що при односторонньому намагнічуванні датчиком розподіл магнітного потоку по товщині металу не рівномірний і локальність вимірювання коерцитивної сили обмежена габаритами (базою вимірювання) датчика.

Вимірювання об'єму феромагнітної фази (α -Fe) в аустенітній сталі проводили ферітометром «Ferritghaltmesser 1.053 Forster».

Результати експериментальних досліджень.

На рис. 2 показана кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження з амплітудою знакозмінної деформації $\epsilon_a = \pm 0,4$ % («жорстке» навантаження) в залежності від бази вимірювання датчиків. З отриманих даних слідує, що зі зменшенням бази вимірювання (збільшенням локальності вимірювань) значення коерцитивної сили збільшуються. Таким чином, використання структуроскопу не глибокого намагнічування зі зменшеною базою датчика D12 дозволяє отримувати більш високі значення коерцитивної сили і більш точно та детально (у різних напрямках відносно напрямку навантаження) дослідити її кінетику в поверхневих більш локальних зонах металу при механічному навантаженні.

На рис. 3 приведена кінетики коерцитивної сили, яку вимірювали за допомогою датчика D12 в зоні руйнування, по числу циклів навантаження з амплітудою деформації $\epsilon_a = \pm 0,5$ % в залежності від орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика відносно напрямку навантаження (напрямок вимірювання уздовж або поперек зовнішньої поверхні зразка з труби). Наявність перелому на кривій кінетики коерцитивної сили по числу циклів навантаження при циклічному знакозмінному деформуванні свідчить про стадійність процесів пошкодження металу: зростання значень коерцитивної сили відповідає пружнопластичному деформуванню (стадії зародження тріщин), а зниження значень H_c – стадії розвитку тріщин, пов'язаної зі зниженням магнітних властивостей

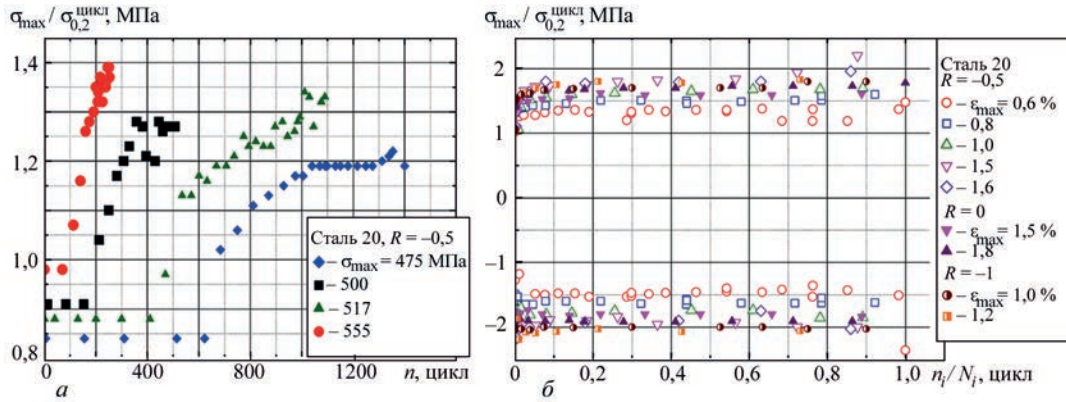


Рис. 1. Відмінності характеру відносної навантаженості металу зразків із сталі 20 при «м'якому» (а) та «жорсткому» (б) циклічному навантаженні

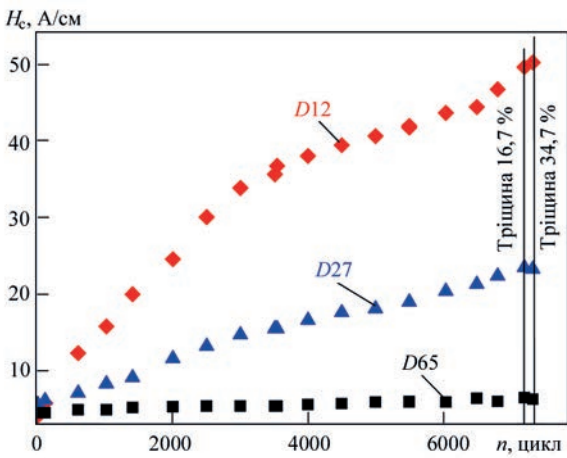


Рис. 2. Кінетика значень коерцитивної сили H_c по числу циклів напрацювання з амплітудою знакозмінної деформації $\epsilon_a = \pm 0,4\%$ в залежності від бази вимірювання датчиків

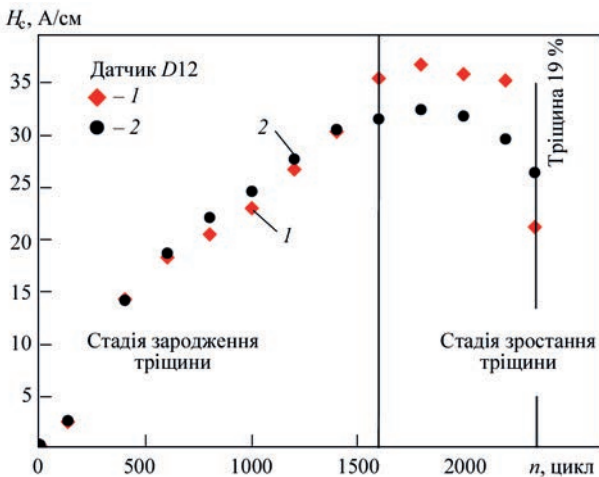


Рис. 3. Кінетика коерцитивної сили H_c в зоні руйнування, по числу циклів навантаження з амплітудою деформації $\epsilon_a = \pm 0,5\%$ в залежності від орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика уздовж (1) або поперек (2) зовнішньої поверхні зразка з труби металу при втраті його суцільності. Перелом кривої кінетики коерцитивної сили в залежності від числа циклів малоциклового «жорсткого» навантаження обумовлений появою та розвитком тріщин втоми (втрати суцільності металу) в зоні руйнування після 1600 циклів циклічного знакозмінного деформування (рис. 4). При цьому крім магні-

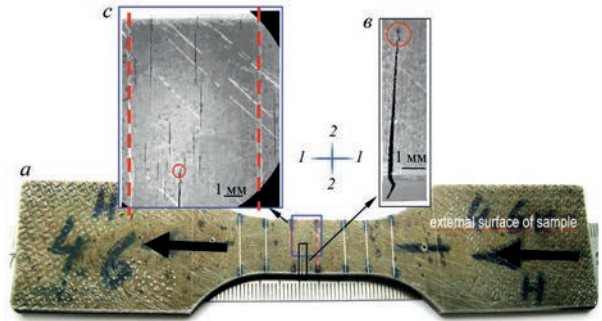


Рис. 4. Макрознімки зразка (а) після циклічного напрацювання до появи магістральної тріщини площею 19 % номінального поперечного перерізу; де b, c – фрагменти ділянки з тріщинами на зовнішній поверхні зразка; напрямки орієнтації полюсів наконечників магнітів уздовж (1-1) та поперек (2-2) осі зразка

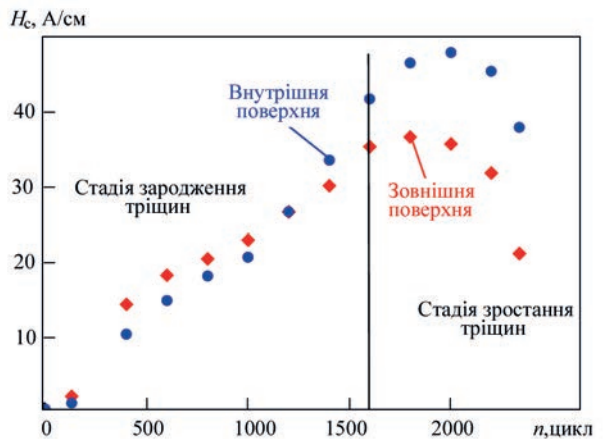


Рис. 5. Кінетика коерцитивної сили на зовнішній і внутрішній поверхнях зразка із труби в зоні руйнування при положенні полюсів наконечників магнітів датчика уздовж робочої довжини зразка при циклічному деформуванні з амплітудою деформації $\epsilon_a = \pm 0,5\%$

стральної чвертьеліптичної крайової тріщини (b) в зоні руйнування на зовнішній поверхні зразка виявлено кілька дрібних (близько 1 мм) не наскрізних тріщин (c), характерні тільки для зовнішньої поверхні зразка (1, відповідно, труби) і відсутні на внутрішній поверхні.

Такий характер руйнування пов'язаний з відмінністю технологічних залишкових напружень

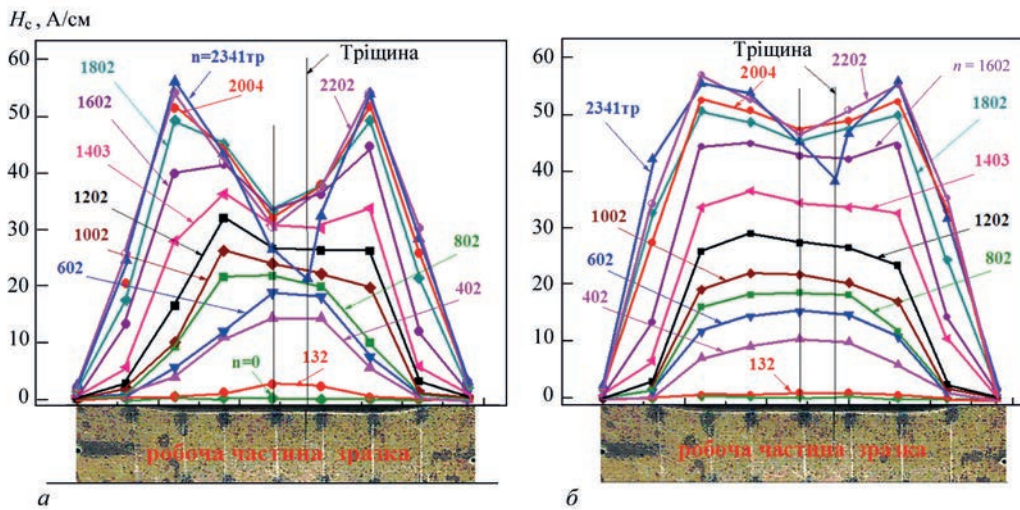


Рис. 6. Розподіл значень коерцитивної сили H_c по зовнішній (а) та внутрішній (б) поверхні робочої довжини зразка з труби при малоциклового «жорсткому» навантаженні при орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика вздовж зразка розтягу та стиску у зовнішніх та внутрішніх шарах труби з повздовжнім зварним швом, виготовленої із листового металу. Дана обставина впливає на характер кінетики коерцитивної сили на зовнішній та внутрішній сторонах зразка із труби при циклічному навантаженні (рис. 5). Поя-

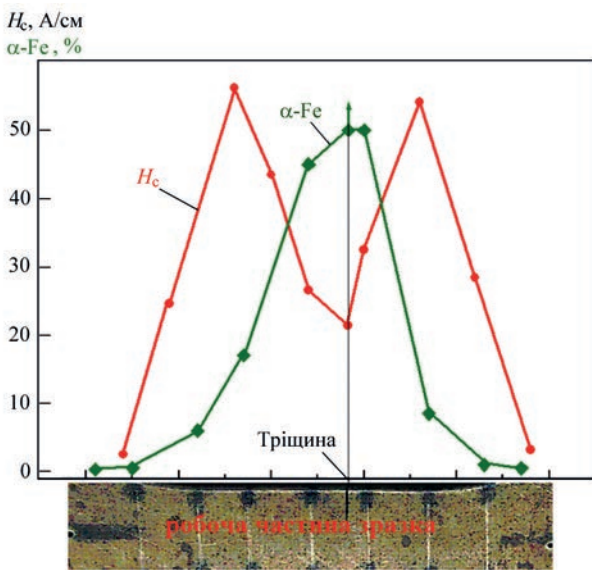


Рис. 7. Розподіл об'єму феромагнітної фази (α -Fe) і коерцитивної сили H_c по робочій довжині зразка після малоциклового «жорсткого» навантаження до руйнування з амплітудою пружнопластичної деформації $\epsilon_a = \pm 0,5\%$

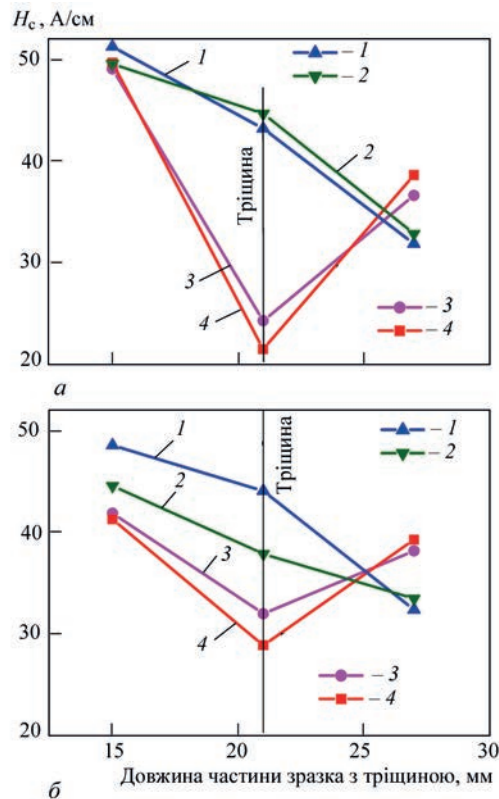


Рис. 8. Значення коерцитивної сили H_c на зовнішній (а) і внутрішній (б) поверхнях зразка при орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика вздовж (3, 4) та поперек (1, 2) робочої частини зразка (при $n = 7204$, тріщина 16,7% (1, 3) і $n = 7328$, тріщина 33,4% (2, 4))

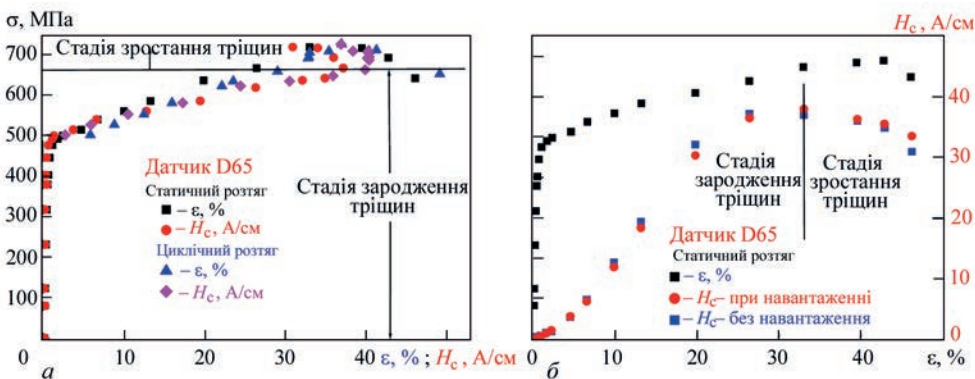


Рис. 9. Діаграми статичного та циклічного розтягу (а) та залежність коерцитивної сили H_c вимірювано датчиком D65, від деформацій ϵ (б) при розтязі з розвантаженням, у навантаженому та розвантаженому стані

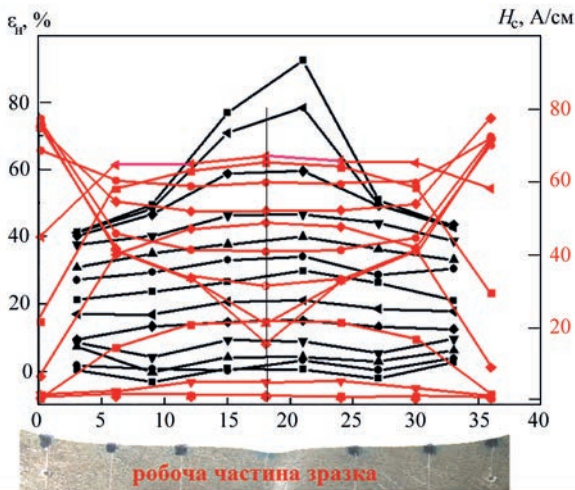


Рис. 10. Розподіл деформацій ϵ_n (чорні лінії) і коерцитивної сили H_c (червоні лінії), виміряної за допомогою датчика D12 у повздовжньому напрямку, по довжині робочої частини зразка при розтязі

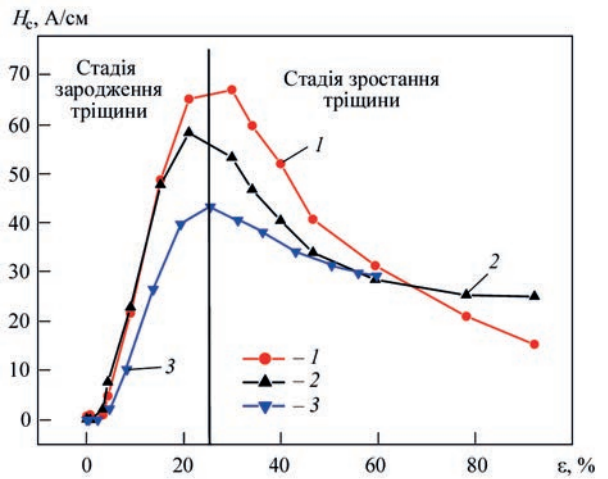


Рис. 11. Залежність значень коерцитивної сили, виміряної за допомогою датчиків D12 і D27, від накопичених деформацій зразка при розтягуванні при орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика вздовж (1 – D12) і поперек (1 – D12; 3 – D27) зовнішньої поверхні робочої частини зразка із труби

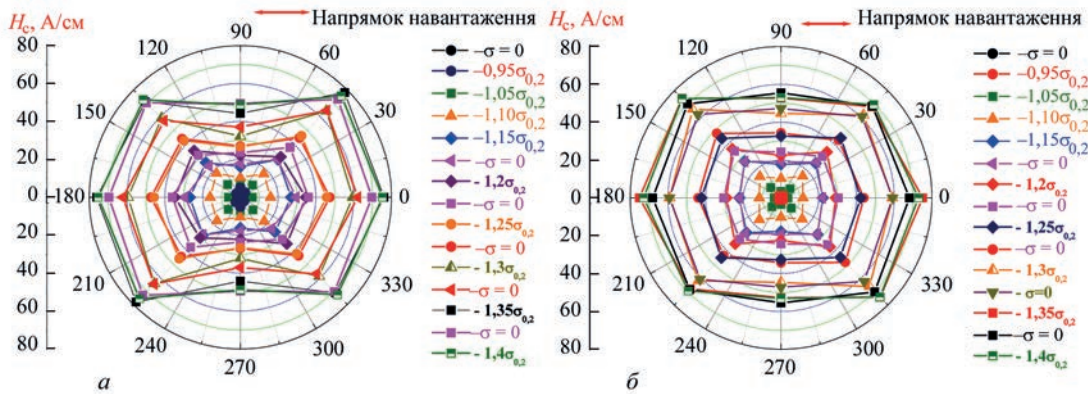


Рис. 12. Епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентратором напружень від не-наскрізного отвору діаметром 3,5 мм – сторона I (а) та з протилежної сторони навпроти ненаскрізного отвору – сторона II (б)

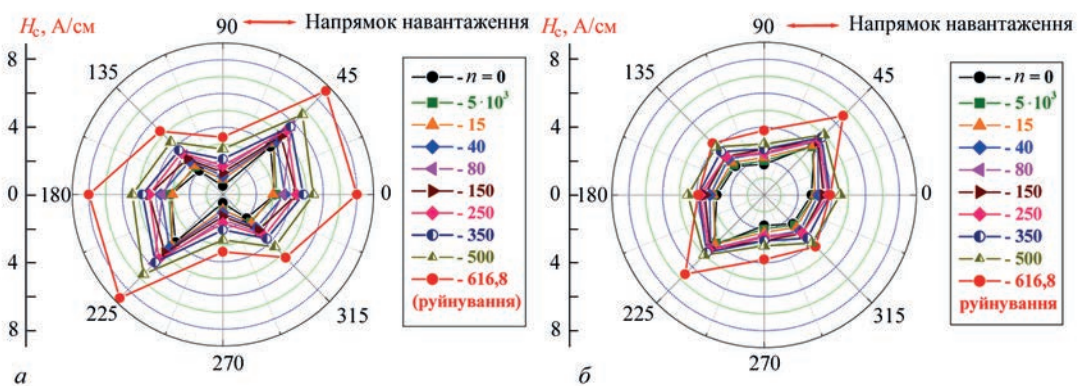


Рис. 13. Епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні зразка з концентратором напружень в зоні отвору (а) та на (протилежній отвору (б) стороні зразка) при різному числі циклів напруцювання ва тріщин втоми на зовнішній поверхні зразка із труби обумовлює більш інтенсивне зниження магнітних властивостей металу і, відповідно, зниження значень коерцитивної сили, враховуючи нерівномірність розподілу по товщині металу магнітного поля при намагніченні на фоні пружнопластичного деформування об'єму металу, у тому числі між тріщинами. В той самий час на внутрішній поверхні зразка із труби, де тріщини втоми відсутні, теж відбувається пружнопластичне деформування, яке обумовлює інтенсивне зростання значень коерцитивної сили, але наявність тріщин втоми на зовнішній поверхні зразка обумовлює зміну напрямку її кінетики. Дана

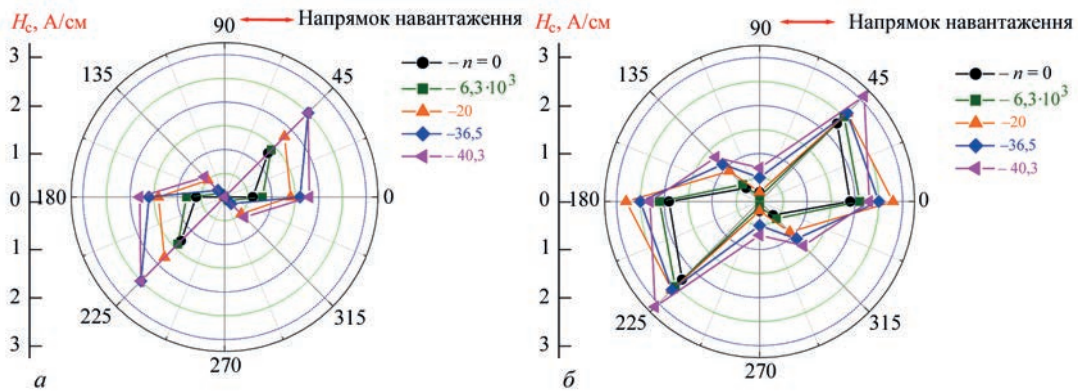


Рис. 14. Епюри розподілу значень коерцитивної сили по зовнішній (а) та внутрішній (б) поверхнях зразка з концентратором напружень у вигляді зварного шва при різному числі циклів напруцювання

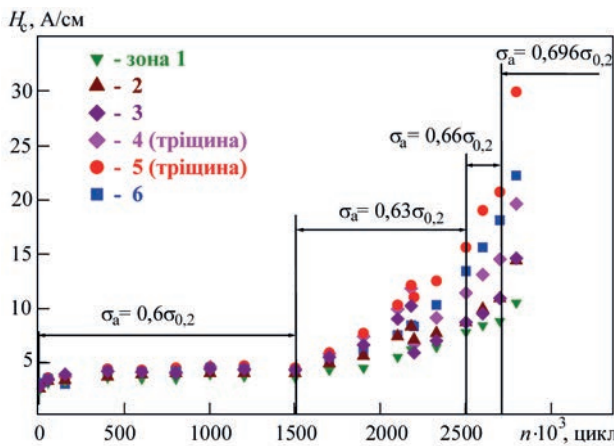


Рис. 15. Залежність коерцитивної сили від амплітуди напружень у різних по довжині робочої частини зразка зонах

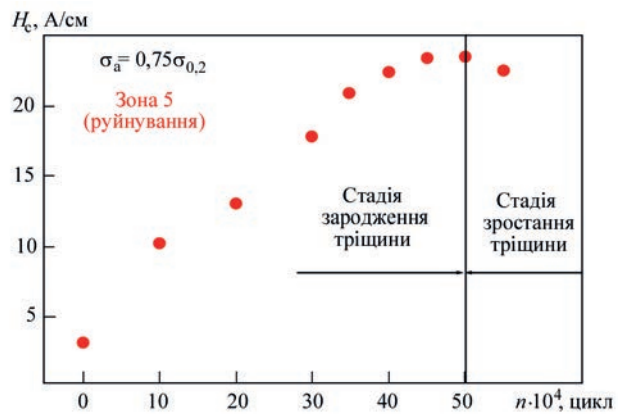


Рис. 16. Кінетика зміни коерцитивної сили H_c від числа циклів n навантаження при частоті 80 Гц у зоні руйнування робочої частини лабораторного зразка при амплітуді напружень $\sigma_a = 0,75\sigma_{0,2}$

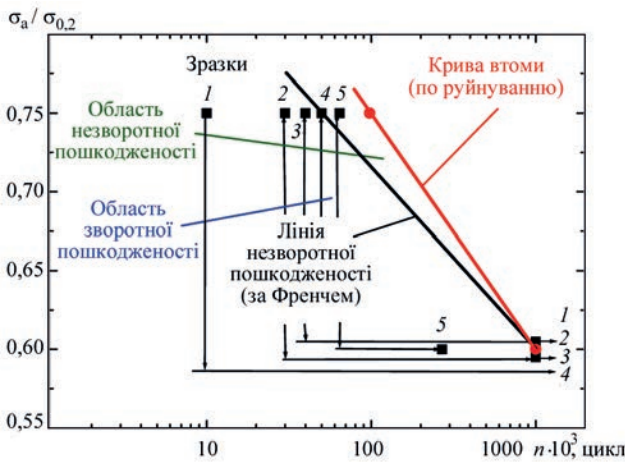


Рис. 17. Схема побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем): зразок 1 – напруцювання $n = 1 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 10,3$ А/см; 2 – $n = 3 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 17,8$ А/см; 3 – $n = 4 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 22,4$ А/см; 4 – $n = 5 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 23,5$ А/см; 5 – $n = 5,5 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 22,4$ А/см

зміна напрямку кінетики коерцитивної сили при циклічному навантаженні пов'язана з чутливістю датчика до наявності підповерхневих тріщин і свідчить про можливість їх виявлення структуроскопом з малогабаритним датчиком неглибокого намагнічування. Ця обставина свідчить про можливість моніторингу процесів накопичення пошкоджень як на поверхні виробу, так і у підпо-

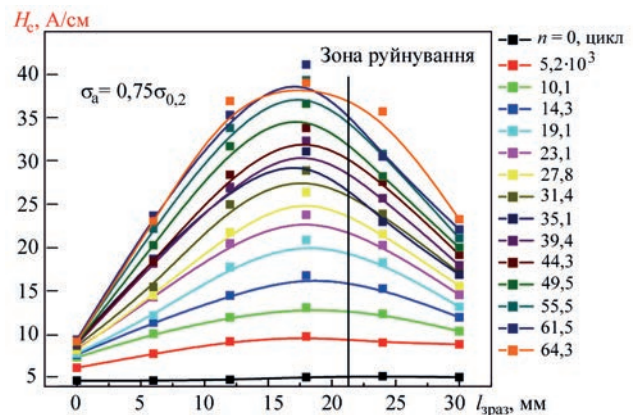


Рис. 18. Розподіл значень коерцитивної сили по довжині робочої частини гладкого зразка

верхневих шарів металу (над дефектом) в період експлуатації, наприклад, з внутрішньої поверхні, до якої не має доступу.

Використання структуроскопу з малогабаритним датчиком не глибокого намагнічування D12 з базою вимірювання 12×12 м дозволило проводити сканування з кроком 6 м (половина габариту датчика) поверхні робочої частини зразка із труби при орієнтуванні у двох взаємно перпендикулярних напрямках наконечників полюсів магнітів датчика відносно напрямку навантаження і побудувати розподіл значень коерцитивної сили по

зовнішній і внутрішній поверхнях при випробуваннях. На рис. 6 наведено розподіл значень коерцитивної сили H_c по зовнішній та внутрішній поверхні робочої довжини зразка із труби при малоцикловому «жорсткому» навантаженні з амплітудою пружнопластичної деформації $\varepsilon_a = \pm 0,5\%$ при орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика вздовж зразка. Зниження значень коерцитивної сили в зоні руйнування на внутрішній поверхні зразка при відсутності видимих тріщин вказує на можливість використання коерцитиметричного контролю для виявлення підповерхневих тріщин.

Слід зазначити, що зниження значень коерцитивної сили на ділянці зони руйнування пов'язано з втратою суцільності матеріалу (появі та розвитку тріщин втоми). При цьому втрата суцільності металу не впливає на зростання долі феромагнітної фази (α -Fe) внаслідок безперервного пружнопластичного деформування металу, у тому числі між тріщинами (рис. 7). Але втрата суцільності металу (поява тріщин) викликає більш інтенсивне зниження значень коерцитивної сили, ніж пружнопластичне деформування, яке сприяє підвищенню об'єму феромагнітної фази (α -Fe) навіть з дефектами, що виникли (тріщинами) та повинна підвищувати значення H_c . При цьому зміни структури металу, оціненої об'ємом феромагнітної фази (α -Fe), навіть після виникнення та розвитку тріщин, не впливають на зростання їх значень і не відображають процесів накопичення пошкоджень.

При механічному навантаженні експериментально була встановлена залежність значень коерцитивної сили від орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика відносно напрямку навантаження, що дозволяє для реальних конструкцій визначати напрямок головних напружень і виявляти появу поверхневих та підповерхневих тріщин втоми. На рис. 8 наведені дані значень коерцитивної сили в зоні тріщини та на прилеглих ділянках після циклічного напрацювання (з амплітудою деформації $\varepsilon_a = \pm 0,4\%$) до числа циклів $n = 7204$ та $n = 7328$ (при цьому площа тріщини складала, відповідно, 16,7 і 33,4 % номінальної).

Вимірювання значень коерцитивної сили проводили при розташуванні тріщини втоми по середині між полюсами наконечників полюсів магнітів датчика та на віддаленні середини датчика на 6 мм в обох напрямках від тріщини (на прилеглих до тріщини ділянках) із зовнішньої і внутрішньої поверхонь зразка при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика вздовж і поперек його робочої частини. При орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика уздовж зовнішньої поверхні робочої частини зразка (вздовж напрямку прикладеного навантаження, тобто перпендикулярно напрямку тріщини) в зоні тріщини мають

місце більш низькі значення коерцитивної сили по відношенню до периферійних зон, що сприяє їх виявленню. Слід зазначити, що при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика уздовж робочої частини зразка на внутрішній поверхні зразка із труби, де тріщини втоми відсутні, також має місце зниження значень коерцитивної сили (рис. 8, б). Це підтверджує можливість виявлення підповерхневих тріщин за допомогою малогабаритного датчика D12.

При циклічному «жорсткому» навантаженні, коли в процесі знакозмінного пружно-пластичного деформування, яке обумовлює процеси накопичення пошкоджень від втоми, в металі відбуваються описані вище структурні перетворення, які викликають зміни значень коерцитивної сили. Аналогічні закономірності структурних перетворень, які обумовлюють зміни значень коерцитивної сили, відбуваються також в умовах одновісного статичного та циклічного розтягу, коли накопичення деформацій від розтягу та циклічної повзучості, обумовлюють квазістатичне руйнування.

На рис. 9 приведена діаграми статичного та циклічного розтягу і зміни значень коерцитивної сили, виміряною датчиком D65, при розтязі та залежність коерцитивної сили H_c від деформацій ε при ступінчатому розтязі з розвантаженням, у навантаженому та розвантаженому стані. Важливо відзначити, що на початковій стадії розтягу, включаючи пружно-пластичну область, зміни значень коерцитивної сили відбуваються у відповідності з діаграмою розтягу. При подальшому пластичному деформуванні має місце деяке відставання темпу зростання значень коерцитивної сили по відношенню до прикладених напружень. Після досягнення значень накопичених деформацій приблизно 35...40 % відбувається різке зниження значень коерцитивної сили.

Закономірності різкого зниження значень коерцитивної сили після досягнення екстремуму при розтязі аналогічні «жорсткому» навантаженню, ймовірно, пов'язані з втратою суцільності металу шляхом утворення і зростання кількості і розміру пор. За літературними даними [18] однією з причин такої поведінки коерцитивної сили може бути зниження залишкових стискаючих напружень через зменшення щільності металу, викликаного накопиченням ушкоджень кристалів, утворенням пор і несцільностей при пластичному деформуванні розтягом.

Слід відмітити, що значення коерцитивної сили при ступінчатому розтязі з розвантаженням у навантаженому та розвантаженому стані, практично, збігаються. Таким чином, по величині коерцитивної сили на висхідних або низхідних ділянках кривих можна оцінювати залишкову міцність металу на різних стадіях пошкодження незалежно від наявності навантаження.

На рис. 10 приведено розподіл накопичених деформацій ϵ_n і коерцитивної сили H_c по робочій довжині зразка з труби при статичному розтязі при ступінчастому підвищенні деформації розтягу на 5 %. При розтязі до рівня номінальної деформації близько 25 % у найбільш деформованій зоні зразка відбувається зростання коерцитивної сили до 67,0 А/см, а при подальшому навантаженні має місце зниження значень H_c до 15,3 А/см, ймовірно пов'язане з поступовою втратою суцільності металу в зоні руйнування.

На рис. 11 показана залежність значень коерцитивної сили, виміряної за допомогою датчиків D12 і D27 від накопичених деформацій (ϵ) у найбільш деформованій локальній зоні (руйнування) зразка при розтязі при орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика вздовж і поперек зовнішньої поверхні робочої частини зразка із труби. При орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика D12 у поздовжньому напрямку робочої частини зразка максимальні значення коерцитивної сили на 13 % перевищують аналогічні значення при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів у його поперечному напрямку. Наявність висхідних та низхідних ділянок на графіках може свідчити про стадійність і зміну переважаючих механізмів накопичення пошкоджень у металі при розтязі. Висхідній ділянці кривої відповідає пружнопластичне деформування (стадія зародження тріщин), а низхідній – утворення і розвитку пор і тріщин (стадія розвитку тріщин).

Використання для досліджень структуроскопу з датчиком зі зменшеною базою вимірювання D12, завдяки можливості змінювати орієнтацію датчика відносно напрямку навантаження, дозволило побудувати епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні локальних зон лабораторних зразків при механічному навантаженні.

На рис. 12 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні лабораторних зразків у зоні ненаскрізного («глухого» на половину товщини зразка) отвору діаметром 3,05 мм (сторона I) та з протилежної сторони (сторона II, напроти отвору) при ступінчастому навантаженні на циклічний розтяг з розвантаженням. Як слідує з отриманих результатів значення коерцитивної сили в зоні концентратора напружень («глухого» отвору) та з протилежної сторони (напроти отвору), практично, співпадають незважаючи на відсутність металу у порожнині отвору.

Для виявлення відмінностей у реагуванні коерцитивної сили на багатоциклове навантаження, у порівнянні з малоцикловим, проведено відповідні випробування. На рис. 13 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні зразка з концентратором напружень у вигляді не наскрізного («глухого») отвору діаметром 1,35 мм (глиби-

ною 1,8 мм, що відповідає половині товщини зразка) в зоні отвору та на протилежній «глухому» отвору стороні зразка при випробуваннях на багатоциклову втому при частоті навантаження 80 Гц при різному числі циклів напрацювання. Слід звернути увагу на суттєві відмінності максимальних значень коерцитивної сили та характер епюр розподілу значень H_c по поверхні зразків в зоні концентраторів та на протилежних концентраторах сторонам зразків.

Проведені випробування на багатоциклову втому лабораторних зразків з концентраторами напружень показали, що при навантаженні при номінальних напруженнях рівних межі витривалості в дуже малих об'ємах металу в зоні концентраторів відбувається пружнопластичне деформування металу, яке приводить до істотних змін структури металу і, відповідно, значень коерцитивної сили, на фоні пружного деформування достатньо великого об'єму решти металу, який визначається габаритами датчика. У цьому достатньо великому об'ємі решти металу не відбуваються істотні зміни структури і, відповідно, мають місце невеликі максимальні значення коерцитивної сили. Чутливість приладу до зміни значень коерцитивної сили в зонах концентрації напружень при навантаженні визначається співвідношенням пружно та пластично деформованого об'ємів металу у зоні вимірювання.

Із приведених даних слідує, що значення коерцитивної сили у зоні концентратора напружень приблизно на 25 % перевищують аналогічні значення з протилежної сторони зразка. Дані відмінності у значеннях коерцитивної сили у зоні концентратора напружень та з протилежної сторони зразка (напроти отвору), ймовірно, пов'язані з більш високими значеннями напружень (деформацій) у зоні концентратора напружень та їх розподілом по перерізу зразка і їх впливом на значення H_c .

Для прикладу, на рис. 14 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по зовнішній та внутрішній поверхнях зразка з концентратором напружень у вигляді поперечного зварного шва при випробуваннях на багатоциклову втому при різному числі циклів напрацювання. Відмінності характеру епюр та максимальних значень коерцитивної сили по зовнішній та внутрішній поверхнях, ймовірно, пов'язані з відмінностями геометричних параметрів зварного шва що, в свою чергу, впливає на ступінь концентрації напружень та розподіл напружень по перерізу зразка, та дії залишкових технологічних напружень від виготовлення труби із листового металу.

Неспівпадіння напрямку максимальних значень коерцитивної сили з напрямком навантаження пов'язане, ймовірно, з впливом залишкових напружень (деформацій) від калібрування з «прокруткою» труби, з якої були виготовлені лабораторні зразки, оскільки циклічне навантаження здійсню-

вали при напруженнях, рівних межі витривалості металу, коли не відбуваються істотні зміни структури, які не були зафіксовані структуроскопом.

Для визначення реагування коерцитивної сили на багатоциклове навантаження лабораторних зразків з розмірами робочої частини $28 \times 14 \times 5$ мм без концентраторів напружень, при напруженнях менших межі плинності, були проведені випробування на осьовий знакозмінний розтяг-стиск з частотою 80 Гц та асиметрією циклу напружень $R_\sigma = -1$.

На рис. 15 приведена залежність коерцитивної сили від амплітуди напружень у різних зонах (зони 1–6) по довжині робочої частини зразка. При циклічному навантаженні з амплітудою напружень $\sigma_a = 0,6\sigma_{0,2}$ у діапазоні $0 \dots 1,5 \cdot 10^6$ числа циклів значення коерцитивної сили H_c , практично, не змінюється, що підтверджує припущення про відсутність суттєвих змін структури металу, а значення амплітуди циклічних напружень може відповідати межі витривалості. Підвищення амплітуди напружень з кроком у 3 % викликає відповідне зростання значень коерцитивної сили, що, ймовірно, пов'язано із зміною структури металу. Слід зазначити, що непрямым свідченням досягнення діючих напружень величини межі витривалості при випробуваннях на багатоциклово втому при частоті навантаження 80 Гц являється початок розігрівання зразка. При циклічному навантаженні за швидкістю зростання коерцитивної сили можна визначати значення обмежених меж витривалості на різних базах довговічності. Нульовим значенням швидкості зростання коерцитивної сили відповідають значення межі витривалості при багатоциклової втомі. Таким чином отримані результати випробувань на багатоциклово втому дозволили розробити фізично обґрунтований метод встановлення межі витривалості для нестабільних аустенітних сталей, який базується на визначенні швидкості зростання значень коерцитивної сили на коротких базах випробувань ($n = 1 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^5$ числа циклів, що відповідає 20...40 хв циклічного навантаження при частоті 80 Гц).

Отримані результати випробувань лабораторних зразків на багатоциклово втому дозволили по зміні напрямку кривої коерцитивної сили розробити дуже простий метод побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем). Де межею зворотної та незворотної пошкоджуваності прийнято вважати екстремум (максимальні значення) на кривій зміни коерцитивної сили при певному числі циклів механічного навантаження (рис. 16). Аналогічні результати були отримані для цієї ж аустенітної сталі для діапазону малоциклової втоми (див. рис. 3, 5) де було встановлено, що зміна тенденції коерцитивної сили до росту чи падіння значень H_c пов'язана із зміною характеру накопичених пошкоджень [4–6].

На рис. 17 приведені результати перевірки схеми побудови кривої незворотної пошкоджуваності, які базуються на даних аналізу кінетики коерцитивної сили (рис. 16) при механічному навантаженні у діапазоні багатоциклової втоми. Для перевірки схеми побудови кривої незворотної пошкоджуваності було проведено попереднє циклічне напрацювання п'яти зразків з амплітудою напружень $0,75\sigma_{0,2}$ до числа циклів $n = 1 \cdot 10^4, 3 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^4, 5 \cdot 10^4$ та $5,5 \cdot 10^4$ з наступним навантаженням з меншою амплітудою напружень $0,6\sigma_{0,2}$ до $n = 1 \cdot 10^6$ циклів (зразки 1–4), або до руйнування (зразок 5). На основі отриманих даних була побудована лінія незворотної пошкоджуваності. Таким чином, на основі отриманих даних розроблено достатньо простий метод побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем) для нестабільних аустенітних сталей, що базується на визначенні екстремуму (максимуму) на кінетичній кривій коерцитивної сили при циклічному напрацюванні, після досягнення якого відбувається падіння значень H_c внаслідок накопичення незворотних пошкоджень. Використання розробленого методу побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем) дозволяє для нестабільних аустенітних сталей при оцінці залишкового ресурсу металу конструкції істотно знизити ризики руйнування.

Як, приклад, приведені нижче результати практичного застосування коерцитиметричного контролю для дослідження ймовірних причин руйнування за межами робочої частини гладких лабораторних зразків постійного поперечного перерізу при випробуваннях на багатоциклово втому. Досвід випробувань на багатоциклово втому при високих частотах навантаження показав, що незважаючи на те, що при виготовленні гладких лабораторних зразків площа поперечного перерізу середньої робочої частини зразка була свідомо занижена на близько 1 % відносно її периферійних зон, руйнування, у більшості випадків, відбувається по галтелі радіусу переходу від робочої частини до ділянки закріплення у активному захваті випробувальної машини. При цьому руйнування лабораторних зразків відбувалось по галтелі зразка при дії амплітуди напружень $\sigma_a^f = 0,81\sigma_a^n$ від номінальних значень (σ_a^n) з мінімальною площею поперечного перерізу по середині робочої частини зразка. Початок руйнування зразка супроводжувався різким зниженням частоти навантаження в наслідок підростання тріщини.

На рис. 18 приведені дані розподілу значень коерцитивної сили по довжині гладкого зразка з розмірами робочої частини $28 \times 14 \times 5$ мм при випробуваннях на багатоциклово втому з частотою навантаження 80 Гц. Хоча руйнування зразка у даному випадку відбувалось в межах його робочої частини, отримані дані показали суттєві відмінності максимальних значень коерцитивної сили

на краях робочої частини із сторони активного та пасивного захватів. На краю робочої частини зразка, ближчій до активного захвату випробувальної машини (на рис. 18, справа), значення коерцитивної сили приблизно у 3 рази перевищують аналогічні величини з іншого краю робочої частини біля пасивного захвату (на рис. 18, зліва). Так як зміна значень коерцитивної сили при навантаженні обумовлена зміною структурного стану металу, і, відповідно, викликає нерівномірність розподілу значень коерцитивної сили по робочій довжині гладкого зразка то, ймовірно, причина руйнування зразків біля активного захвату пов'язана з нерівномірністю розподілу навантаженості та пошкодженості металу по його робочій довжині. Тобто, навантаженість і, відповідно, пошкодженість металу на краях робочої частини, оціненою значеннями коерцитивної сили, біля активного захвату більша ніж біля пасивного захвату, що, ймовірно, пов'язано з запізненням деформацій відносно силового навантаження при високих швидкостях (частоті). У зв'язку з цим, на практиці для випробувань на багатоциклово втому частіше дають перевагу «корсетним» зразкам непостійного попережного перерізу (типу пісочних годинників).

Висновки

Проведено експериментальне обґрунтування можливості оцінки ступеня пошкодження в процесі експлуатації металу конструкцій, у тому числі у зонах концентрації напружень, простим неруйнівним методом за результатами вимірювання значень коерцитивної сили.

При механічному навантаженні відбувається перерозподіл співвідношень феромагнітних та парамагнітних фаз металу, який обумовлює зростання значень коерцитивної сили до певної величини і після втрати суцільності металу при руйнуванні викликає зниження цих значень. Дана обставина дозволила встановити стадії зародження та розвитку тріщин і при експлуатації виробу оцінювати ступінь пошкодження (різного походження) металу конструкції на кожній із стадій простим неруйнівним інструментальним методом одним і тим же приладом.

Встановлення стадійності накопичення пошкоджень по зміні напрямку кінетичних кривих коерцитивної сили після певного числа циклів напруження дозволяє побудувати криву незворотної пошкоджуваності (за Френчем) дуже простим інструментальним методом і проводити оцінку циклічної довговічності не по кривій втому (руйнуванню) металу, як прийнято в інженерній практиці, а на стадії зародження тріщин, що істотно знижує ризики руйнування.

При моніторингу технічного стану елементів конструкцій шляхом виміру значень коерцитивної

сили надається можливість визначати найбільш деформовані та пошкоджені зони, зі встановленням напрямку головних напружень, і виявляти не суцільності металу у вигляді пор або тріщин (у тому числі поверхневих та підповерхневих).

Встановлені обмеження у можливості оцінки ступеня пошкодження аустенітних сталей при багатоциклової втомі, у тому числі зонах концентрації напружень, за вимірами коерцитивної сили. Дані обмеження обумовлені чутливістю приладу, яка залежить від габаритів датчика для вимірювання коерцитивної сили, до співвідношення об'ємів пружно деформованого (до межі витривалості) та пружнопластично деформованого металу у зоні руйнування (вимірювання).

Запропоновано фізично обґрунтований метод встановлення границі витривалості для аустенітної нестабільної сталі, який базується на визначенні швидкості зростання коерцитивної сили на коротких базах циклічного навантаження. За швидкістю зростання коерцитивної сили можна встановлювати значення обмеженої границі витривалості на різних базах довговічності.

В умовах експлуатації, при моніторингу розподілу значень коерцитивної сили по поверхні виробу у найбільш навантажених ділянках, слід звертати увагу не на максимальні значення H_c , які можуть перевищувати аналогічні дані у зоні руйнування, а на зміну напрямку кінетичної кривої H_c на таких ділянках. При цьому в зонах прилеглих до зони руйнування внаслідок пружно-пластичного деформування може продовжуватись зростання значень коерцитивної сили. В умовах експлуатації виробів зміна напрямку кінетичної кривої коерцитивної сили вказує на завершення стадії зародження тріщин і початок стадії руйнування (розвитку тріщин), що збільшує ризики руйнування. У цьому випадку доцільне застосування інших неруйнівних методів контролю, наприклад, вимірювання товщини металу та ультразвукового контролю для визначення розмірів та розташування дефектів (тріщин) в об'ємі металу зони руйнування.

Таким чином, отримані експериментальні результати дають оптимістичний прогноз можливості оцінки накопичення втомних пошкоджень на різних стадіях втоми в локальних найбільш пошкоджених зонах конструктивних елементів простим неруйнівним інструментальним методом. Дана обставина має всі ознаки новизни і може знайти широке застосування як для дослідницьких цілей, так і для практичного використання при діагностуванні пошкоджуваності елементів конструкцій.

Метод діагностування технічного стану виробів полягає у проведенні попередніх розрахунків НДС для встановлення найбільш навантажених локальних зон металу конструкції та послідуючого вимірювання значень коерцитивної сили на поверх-

ні у цих зонах. Оскільки значення коерцитивної сили залежить від орієнтації наконечників полюсів магнітів відносно напрямку діючих напружень, то при діагностуванні технічного стану виробів у найбільш небезпечних локальних зонах вимірювання значень H_c на поверхні необхідно проводити у чотирьох напрямках при повороті датчика через кожні 45° відносно попереднього вимірювання з подальшим уточненням напрямку максимальних значень H_c . Для оцінки технічного стану найбільш небезпечних зон в процесі експлуатації конструкції необхідно періодично проводити моніторинг значень коерцитивної сили з побудовою її кінетики. Отримані результати можуть слугувати даними для подальшої оцінки технічного стану виробу.

Отримані результати можуть стати основою для розробки нових підходів щодо експресної оцінки залишкового ресурсу металу конструкцій простим неруйнівним методом.

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи відділу втомі і термовтоми матеріалів Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України за темою 1.3.4.1910 «Розробка методів оцінки втомного пошкодження металічних матеріалів на стадіях зародження і росту тріщин».

Список літератури

- Христенко І.Н., Кривова В.В. (1984) Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали. *Дефектоскопия*, **6**, 90–98.
- Горкунов Э.С., Федоров В.П., Бухвалов А.Б., Веселов И.Н. (1997) Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик. *Там же*, **4**, 87–95.
- Попов В.А., Гудошник В.А. (2012) Мифы и реальность применения магнитной структуроскопии при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений. *Подъемные сооружения. Специальная техника*, **12**, 20–21.
- Гопкало А.П., Безлюдько Г.Я., Нехотящий В.А. (2017) К экспертной оценке поврежденности стали AISI 304 при статическом и циклическом нагружении по измерениям коэрцитивной силы. *В мире неразрушающего контроля*, **20**, 45–51.
- Гопкало О., Безлюдько Г., Нехотящий В. (2017) Оцінка пошкодженнь металу конструкцій при статичному та циклічному деформуванні по кінетиці коерцитивної сили. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці конференції. 19–22 вересня 2017 р. Тернопіль*, сс.73–78.
- Gopkalo O., Bezlyudko G., Nekhotiashchiy V. (2018) Evaluation of the structures metal damage under the static and cyclic loadings according to the coersive force value. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil. TNTU, **89**, **1**, 19–32. (Mechanics and materials science).
- Bezlyudko G.Ya., Popov B.E., Solomaha R.N. (2015) Primenenie metoda koercitivnoi sily segodnya. *V mire nerazruwayutishego kontrolya*. Sankt Peterburg, **18**, **4**, 4–8. [in Russian].
- Nehotyatshii V.A., Palienko A.L., Gopkalo A.P. (2015) Osenka degradacii stali 08H18N9 po kinetike koercitivnoi sily. *Ibid.*, 14–16. [in Russian].
- Стрижало В.А. (1978) *Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур*. Киев, Наукова думка.
- Трошенко В.Т., Стрижало В.А., Синявский Д.П., Ивахненко В.В. (1982) О влиянии коэффициента асимметрии цикла напряжений на развитие усталостного и квазиста-

тического разрушения при малоцикловом нагружении. *Проблемы прочности*, **8**, 14–21.

- Иванова В.С., Терентьев В.Ф. (1975) *Природа усталости металлов*. Москва, Металлургия.
- Миллер К.Ж. (1994) Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее. *Заводская лаборатория*, **3**, 544–561.
- Новиков И.И., Ермишкин В.А. (1995) Об анализе деформационных кривых металлов. *Металлы*, **6**, 142–154.
- Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. (2001) *Циклическая прочность металлических материалов*. Учеб. пособие. Новосибирск, Изд-во НГТУ.
- Pangborn R.N., Weissmann S., Kramer J.R. (1978) Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue. *Ser. Met.*, **12**, **2**, 129–131.
- Sato Y., Sasaki H., Kumana A. (1980) Surface layer yielding of low-carbon steel cylinders. *J. Mater. Sci. Soc. Jap.*, **17**, **3–4**, 185–192.
- Miyazaki S., Shibata K., Fujita H. (1979) Effect of specimen thickness on Mechanical Properties of Polycrystalline Aggregates with Various grain sizes. *Acta met.*, **27**, **5**, 855–863.
- Гуляев А.П. (1951) *Металловедение*. Москва.

References

- Khristenko, I.N., Krivova, V.V. (1984) Effect of plastic deformation on coercive force of low-carbon steel. *Defektoskopiya*, **6**, 90–98 [in Russian].
- Gorkunov, E.S., Fedorov, V.P., Bukhvalov, A.B., Veselov, I.N. (1997) Modeling of deformation curve based on measurement of its magnetic characteristics. *Ibid.*, **4**, 87–95 [in Russian].
- Popov, V.A., Gudoshnik, V.A. (2012) Myths and reality of application of magnetic structuroscopy at evaluation of the stress-strain state in metal structures of lifting facilities. Lifting facilities. Podjomnye Sooruzheniya. *Spetsialnaya Tekhnika*, **12**, 20–21 [in Russian].
- Gopkalo, A.P., Bezlyudko, G.Ya., Nekhotiashchiy, V.A. (2017) To expert evaluation of damage of AISI 304 steel under static and cyclic loading by coercive force measurements. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, **20**, 45–51 [in Russian].
- Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V. (2017) Assessment of structure metal damage at static and cyclic deformation by the kinetics of coercive force. *Damage of materials during operation, methods for its diagnosis and forecasting. In: Proc. of Conference (19-22 September 2017, Ternopil)*, pp. 73-78 [in Ukrainian].
- Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V. (2018) Evaluation of the structures metal damage under the static and cyclic loadings according to the coercive force value. *Scientific J. of TNTU*. Ternopil. TNTU, **89**(1), 19–32. (Mechanics and Materials Science).
- Bezlyudko, G.Ya., Popov, B.E., Solomaha, R.N. (2015) Application of the coercive force method today. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, St.-Petersburg, **18**(4), 4-8 [in Russian].
- Nehotyatshii, V.A., Palienko, A.L., Gopkalo, A.P. (2015) Evaluation of 08H18N9 steel degradation according to coercive force kinetics. *Ibid.*, 14-16 [in Russian].
- Strizhalo, V.A. (1978) *Cyclic strength and creep of metals under low-cycle loading at low- and high-temperature conditions*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- Troshchenko, V.T., Strizhalo, V.A., Sinyavskiy, D.P., Ivakhnenko, V.V. (1992) About effect of the coefficient of stress cycle asymmetry on propagation of fatigue and quasi-static fracture under low-cycle loading. *Problemy Prochnosti*, **8**, 14–21 [in Russian].
- Ivanova, V.S., Terentiev, V.F. (1975) *Nature of fatigue of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Miller, K.Zh. (1994) Fatigue of metals: Past, present and future. *Zavodskaya Laboratoriya*, **3**, 544–561 [in Russian].
- Novikov, I.I., Ermishkin, V.A. (1995) On analysis of deformation curves of metals. *Metally*, **6**, 142–154 [in Russian].
- Terentiev, V.F., Oksogoev, A.A. (2001) *Cyclic strength of metallic materials: Manual*. Novosibirsk, NGTU [in Russian].
- Pangborn, R.N., Weissmann, S., Kramer, J.R. (1978) Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue. *Ser. Met.*, **12**(2), 129–131.

16. Sato, Y., Sasaki, H., Kumana A. (1980) Surface layer yielding of low-carbon steel cylinders. *J. Mater. Sci. Soc. Jap.*, 17(3-4), 185-192.
17. Miyazaki, S., Shibata, K., Fujita, H. (1979) Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain sizes. *Acta Met.*, 27(5), 855-863.
18. Gulyaev, A.P. (1951) *Metal science*. Moscow [in Russian].

DIAGNOSIS OF DAMAGE IN AUSTENITIC STEEL AISI 304 AT MECHANICAL LOADING BY MEASUREMENTS OF COERCIVE FORCE

O.P. Gopkalo¹, V.O. Nekhotiashchiy², G.Ya. Bezlyudko³, Yu.P. Kurash¹, R.M. Solomakha³

¹G.P. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevskaya Str., 01014, Kyiv.

E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

³CC «Spetsialni naukovi rozrobky», PO box 12036, 61184, Kharkiv, Ukraine

The paper gives the results of experimental studies of applicability of coercimetric control for assessment of the degree of metal damage at mechanical loading by measuring the coercive force. It is shown that the differences in the reaction of the coercive force on mechanical loading of ferromagnetic and austenitic steels consist in differences of physical nature of these phenomena. For ferromagnetic steels the changes of coercive force values at mechanical loading are related to ordering of the orientation of metal domain structure (from the chaotic to directional). Reaction of the coercive force on mechanical loading of paramagnetic (in the initial state) unstable austenitic steel AISI 304 (08Kh18N9) is related to structural transformations during deformation of initial austenite into deformation martensite with final ferrite-pearlite decomposition. Mechanical loads result in the change of the ratio of ferromagnetic and paramagnetic metal phases, which cause an increase of coercive force values up to a certain level that is followed by lowering of these values at fracture. It was found that increase of the values of the coercive force corresponds to elastic and elasto-plastic deformation (crack initiation stage), while lowering of their values is associated with loss of metal integrity at appearance of pores or cracks (crack propagation stages). For unstable austenitic steels it becomes possible to considerably simplify determination of the endurance limit and establishing the stages of damage accumulation process, by the change of the direction of coercive force kinetics during loading, with plotting of irreversible damage line (by French). Coercimetric monitoring of the surface of real structures allows determination of the direction of principal stresses and detection of initiation of surface and subsurface cracks, as well as assessment of the obtained damage level. 18 Ref., 18 Fig.

Keywords: structuroscope, coercive force, loading, damage, stress, deformation, fracture

Надійшла до редакції
17.07.2019





X спеціалізована виставка **МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ**

місце
проведення

ВЦ «Південний-ЕКСПО»
вул. Щирецька, 36, м. Львів

- металорізальні верстати та оснастка
- металорізальні інструменти
- слюсарний та монтажний інструмент
- зварювальне обладнання
- обладнання для обробки металу

- ручний електроінструмент
- металовироби, вироби для з'єднання та кріплення
- засоби захисту
- ковальське обладнання

Інформаційні спонсори





**7-9
КВІТНЯ
2020**

Контакти

☎ тел./факс: (032) 244-18-88

✉ e-mail: expolviv@gmail.com

🌐 web: www.expolviv.ua

Організатор





ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОБНАРУЖЕННЫМИ КОРРОЗИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

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

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

Гарантирование необходимой остаточной прочности и работоспособности трубопроводов с коррозионными дефектами, обнаруженными при дефектоскопии, предполагает выполнение критериев предельного состояния, которые связывают свойства материала труб и фактическую геометрию конструкции с системой эксплуатационных нагрузок. Одним из путей снижения консервативности соответствующего экспертного анализа является непосредственный учет естественного разброса физико-механических свойств материала. В данной работе предлагается численный подход статистического прогнозирования предельного состояния трубопроводов с дефектами локального утонения стенки, который основан на рассмотрении естественной пространственной неоднородности свойств материала (таких как предел текучести, напряжение микроразрушения, начальная концентрация пористости вязкого разрушения, критическое значение пластической деформации и т. д.) в рамках конечно-элементного описания совместного развития напряженно-деформированного состояния и вязкого докритического повреждения с использованием метода Монте-Карло. Показано, что этот подход характеризуется меньшей консервативностью в сравнении с общепринятыми детерминированными методами, которые предполагают рассмотрение однородных свойств материала. При этом статистический анализ остается достаточно точным для решения характерных задач технической диагностики объектов повышенной опасности. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: трубопровод, дефект коррозионной потери металла, предельное состояние, вероятность разрушения, метод Монте-Карло, вязкое разрушение

Статистическое прогнозирование прочности и надежности ответственных конструкций является практической альтернативой детерминированным методам проектирования и экспертного анализа фактического состояния. Это, в частности, позволяет избежать консервативного предположения о том, что большинство параметров конструкции и свойств материала являются известными постоянными, и учитывать неопределенность входных данных. Применительно к оценке состояния магистральных и технологических трубопроводов под внутренним давлением, одной из характерных задач является определение прочности и надежности с учетом наличия эксплуатационных дефектов, таких как коррозионные (эрозионные) потери металла. Концентрация напряжений в области утонения стенки вызывает увеличение склонности материала к зарождению и распространению разрушения при сравнительно низкой внешней нагрузке. Существует ряд стандартных алгоритмов, позволяющих оценить уровень снижения прочности дефектного трубопроводного элемента (ТЭ) с обнаруженной в процессе дефектоскопии коррозионно-эрозионной потерей металла [1–3]. Используемые критерии предельного состояния требуют определенного набора входных параметров, таких как физико-механические свойства материала, фактическая геометрия конструкции,

характеристики сопротивления определенному типу разрушения; кроме того, обычно делается предположение об однородности материала и его изотропности.

Для снижения консервативности оценки предельного состояния ТЭ с коррозионными повреждениями с учетом стохастического пространственного распределения свойств материала могут быть использованы методы статистической теории прочности, наиболее простым из которых является метод Монте-Карло. Но реализация этого подхода требует точного описания докритического и критического разрушения ТЭ под действием эксплуатационной нагрузки (внутреннего давления P), а также соответствующего высокопроизводительного программного обеспечения.

В рамках данной работы предложен комплексный подход численного прогнозирования прочности и надежности трубопроводов с обнаруженными дефектами коррозионной потери металла с пространственно неоднородными свойствами посредством метода Монте-Карло для реализации статистического анализа прочности наряду с конечно-элементным описанием состояния конкретной конструкции.

Первым этапом разработки указанной методологии было построение соответствующего конечно-элементного описания напряженно-де-

А.С. Миленин <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

© А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Н.И. Пивторак, 2019

формированного состояния (НДС) и рассеянной поврежденности металла конструкции в процессе монтажной сварки и последующей эксплуатации. Применительно к рассматриваемой задаче прогнозирования предельного давления P_r в ТЭ с изолированным поверхностным дефектом локального утонения стенки показало свою эффективность конечно-элементное описание НДС металла в условиях внешнего температурного и силового воздействия наряду с моделированием зарождения и развития вязкого разрушения. Так, кинетика температурного поля при монтажной сварке, которая моделировалась для учета остаточного послесварочного состояния, оценивалась путем численного решения нестационарного уравнения теплопроводности под действием нормально распределенного поверхностного источника тепла (что является общепринятым, в частности, при рассмотрении технологического процесса дуговой сварки) [4]. Прогнозирование развития НДС трубопроводного элемента с полуэллиптическим поверхностным утонением стенки (рис. 1) заключается в реализации прослеживания развития деформаций различной природы совместно с докритическим разрушением по вязкому механизму, которое представляет собой зарождение и развитие микропористости материала. При этом необходимо учитывать упругую и пластическую составляющую тензора деформаций, температурное расширение материала, а также деформацию, обусловленную наличием пор вязкого разрушения. В предыдущих работах авторов было показано, что в этом случае взаимосвязь между компонентами тензора деформаций ε_{ij} (в цилиндрической системе координат $i, j = r, \beta, z$) и напряжений σ_j определяется законом Гука и ассоциированным законом пластического течения, исходя из следующего соотношения [5]:

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

где Δ_j – символ Кронекера; $K = (1-2\nu)/E$ – модуль объемного сжатия; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $G = 0,5E/(1+\nu)$ – модуль сдвига; символ «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; f – объемная концентрация пор вязкого разрушения; σ_m – мембранные напряжения; ε_T – температурные деформации; Ψ – функция состояния материала, которая определяется итерационным методом исходя из следующих условий [6]:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s;$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s; \quad (2)$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо,

где σ_i – интенсивность напряжений; σ_s – поверхность текучести материала.

Зарождение и развитие докритического разрушения по вязкому механизму может быть описано в рамках модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана и закона Райса–Трейси [7, 8], при этом предельное состояние ТЭ соответствует выполнению одного из трех условий [9]:

$$\Psi - \frac{1}{2G} \geq \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1,5\sigma_s(\varepsilon_p, T)}, f^* \rightarrow 2\frac{q_1}{q_3} \cosh\left(1,5q_2\frac{\sigma_m}{\sigma_T}\right),$$

$$\frac{3\sigma_1}{3-2f} > S_K, \quad (3)$$

где S_K – напряжения микроскола; q_1, q_2, q_3 – константы; ε_p – суммарная пластическая деформация; ε_f – предельная деформационная способность материала.

Неопределенность входных данных вызывает разброс значений расчетного предельного внутреннего давления P_r в ТЭ с дефектом утонения. Для формального описания этого явления может быть использован алгоритм, основанный на прямом методе Монте-Карло, в рамках которого принимается, что вероятность разрушения трубопровода p при некотором внутреннем давлении P определяется частотой достижения предельного состояния согласно (3) в рамках репрезентативной выборки равновероятных комбинаций свойств материала трубы, т. е.

$$p(P) = N_p/N_r, \quad (4)$$

где N_p – количество испытаний, при котором конструкция достигла предельного состояния при давлениях, меньших или равных P ; N_r – общее количество испытаний в рамках репрезентативной выборки.

Одной из основных задач при этом является определение необходимого количества испытаний N_p , достаточных для репрезентативной выборки входных данных. Для этого предложен следующий итерационный алгоритм:

1. При относительно небольшом начальном количестве численных экспериментов N_0 определяется зависимость $p_0(P)$.

2. Следующее значение N_1 равняется удвоенному значению предыдущего ($N_1 = 2N_0$) и для N_1 определяется зависимость $p_1(P)$.

3. Если среднеквадратичное отклонение p_0 от p_1 превышает предельное значение Δ_c , то реализуется следующий шаг итерационного алгоритма, т. е. $N_2 = 2N_1$ с последующим расчетом p_2 , и определяется среднеквадратичное отклонение p_1 от p_2 .

4. Если на некотором шаге k отклонение p_{k-1} от p_k становится меньше, чем Δ_c , делается вывод, что число испытаний N_{k-1} достаточно для репрезентативной выборки ($N_{k-1} = N_r$) и принимается, что p_{k-1}

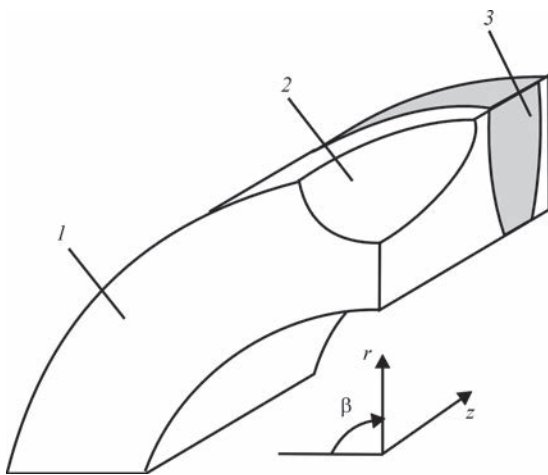


Рис. 1. Схема участка трубопровода с внешним полуэллиптическим дефектом локальной коррозионной потери металла на периферии кольцевого сварного шва: 1 – трубопровод; 2 – дефект; 3 – сварной шов

является истинным значением вероятности разрушения, т. е. $p_{k-1}(P) = p(P)$.

Для формального описания пространственной неоднородности таких свойств материала, как предел текучести и модуль Юнга, принято использовать нормальное распределение, т. е. плотность вероятности характеристики X принять конкретное значение $X_{ijk}(i, j, k = r, \beta, z)$ может быть представлена в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial X_{ijk}} = \frac{1}{\beta_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(X_{ijk} - \alpha_X)^2}{2\beta_X^2} \right], (i, j, k = r, \beta, z), (5)$$

где α_X, β_X – коэффициенты нормального распределения для некоторой характеристики X .

Применительно к различным параметрам сопротивляемости материала разрушению, зачастую применяется закон распределения Вейбулла, поэтому в рассматриваемой задаче некоторая величина Y в точке с координатами (i, j, k) принимает конкретное значение Y_{ijk} согласно следующему соотношению:

$$Y_{ijk} = \left[-\ln(1 - RND) \right]^{\frac{1}{\eta_Y}} (B_Y - A_Y) + A_Y, (i, j, k = r, \beta, z), (6)$$

где A_Y, B_Y, η_Y – коэффициенты Вейбулла для характеристики Y ; RND – произвольное число из диапазона $[0; 1]$.

Применение прямого метода Монте-Карло является достаточно трудоемким и требует значитель-

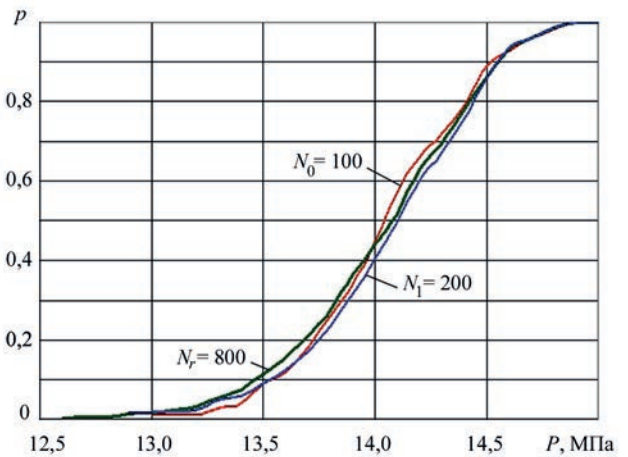


Рис. 2. Зависимости вероятности разрушения трубопровода p ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с внешним коррозионным дефектом ($2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$ мм) от внутреннего давления P при различном количестве испытаний по методу Монте-Карло ($N_0 = 100$ – начальное значение; $N_1 = 200$ – вторая итерация; $N_r = 800$ – репрезентативная выборка)

ных вычислительных ресурсов. Поэтому для реализации предложенных алгоритмов были использованы специализированные программные средства параллельных вычислений, адаптированных для использования на компьютерных комплексах многопроцессорной и гибридной архитектур [10].

В качестве примера применения разработанного численного подхода был рассмотрен стальной элемент магистрального трубопровода (внешний диаметр $D = 1420$ мм, толщина стенки $t = 20$ мм) с изолированным дефектом локального утонения стенки полуэллиптической формы на внешней поверхности трубы (длина $2s = 20$ мм, ширина $2c = 20$ мм, глубина $a = 10$ мм). Материал трубопровода – трубная сталь 17Г1С-У ($E = 206$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 365 \dots 490$ МПа, $S_K = 800 \dots 1000$ МПа). В качестве критерия зарождения пор вязкого разрушения принят деформационный критерий: в изначально неповрежденном металле конструкции зарождается равномерно распределенная несплошность некоторой концентрации f_0 в случае, если интегральная интенсивность пластических деформаций превышает некоторое критическое значение ϵ_c . Значения этих характеристик материала ТЭ приняты следующие: $f_0 = 0,001 \dots 0,010$, $\epsilon_c = 0,001 \dots 0,050$. Коэффициенты распределений данных величин приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты распределения физико-механических характеристик материала трубопровода

Характеристика материала	Нормальное распределение		Распределение Вейбулла		
	α , МПа	β , МПа	A , МПа	B , МПа	η
Предел текучести σ_T , МПа	408	10,34	–	–	–
Начальная концентрация пор вязкого разрушения f_0	–	–	0,0001	$3,97 \cdot 10^{-4}$	2
Критическая деформация разрушения ϵ_c	–	–	0,001	$6,10 \cdot 10^{-3}$	4
Напряжение микроскола S_K , МПа	–	–	800	972	4

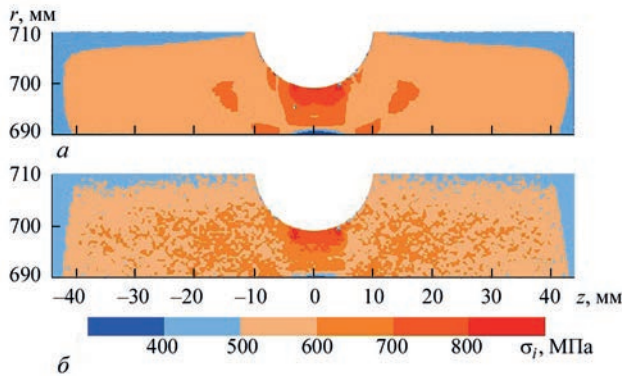


Рис. 3. Примеры распределения интенсивности напряжений в трубопроводе ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с внешним коррозионным дефектом ($2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$ мм) при предельном внутреннем давлении $P_r = 14,0$ МПа: а – традиционный расчет с постоянными свойствами материала; б – расчет согласно алгоритму Монте-Карло

Результаты расчетов показали быструю сходимость итерационного алгоритма определения репрезентативной выборки (рис. 2): если на начальных этапах ($N_0 = 100, N_1 = 200$) среднеквадратичное отклонение может достигать 40 %, то при количестве численных экспериментов, равном 800, дальнейшее увеличение выборки не вызывает существенного роста отклонения ($\Delta < \Delta_c = 0,01$).

На рис. 3 приведены расчетные поля интенсивности напряжений в случае традиционного расчета предельного состояния трубопровода с обнаруженным полуэллиптическим дефектом локальной потери металла (рис. 3, а) в предположении об однородности свойств материала ТЭ и одного из вариантов стохастического распределения свойств в рамках репрезентативной выборки по методу Монте-Карло (рис. 3, б). Из этих данных можно сделать вывод о том, что, несмотря на схожие в целом распределения главных напряжений, учет возможного разброса входных данных позволяет дополнительно рассмотреть локально более высокие напряжения на периферии

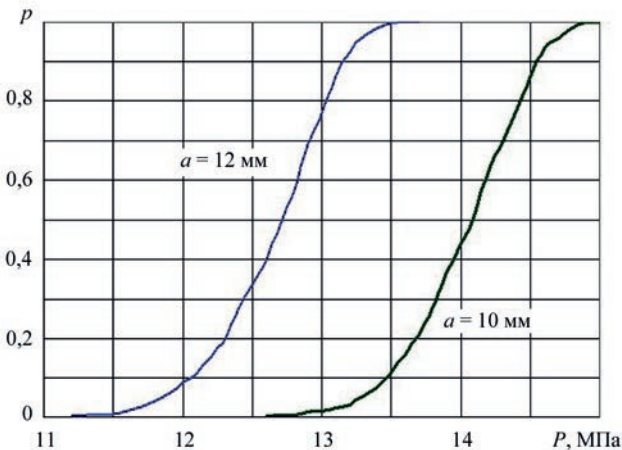


Рис. 4. Зависимость вероятности p разрушения ТЭ с локальным дефектом утонения различной глубины a от внутреннего давления P

дефекта, обусловленные относительно небольшими скачками механических свойств (прежде всего, предела текучести).

Так как вязкое разрушение и соответствующее ему предельное состояние конструкции носит локальный характер, то учет пространственной неопределенности свойств имеет ощутимое влияние на оценку величины предельного давления P_r : как показано на рис. 4, диапазон P , для которого $0,0 < p < 1,0$, составляет $12,6 \dots 14,9$ МПа. Следует также отметить, что точность входных данных (возможный разброс свойств материала) определяет форму кривой $p(P)$, т. е. степень отклонения вероятностного подхода от детерминированного. В случае, если разброс свойств материала уменьшается (табл. 2, рис. 5, а), то характер зависимости $p(P)$ так-

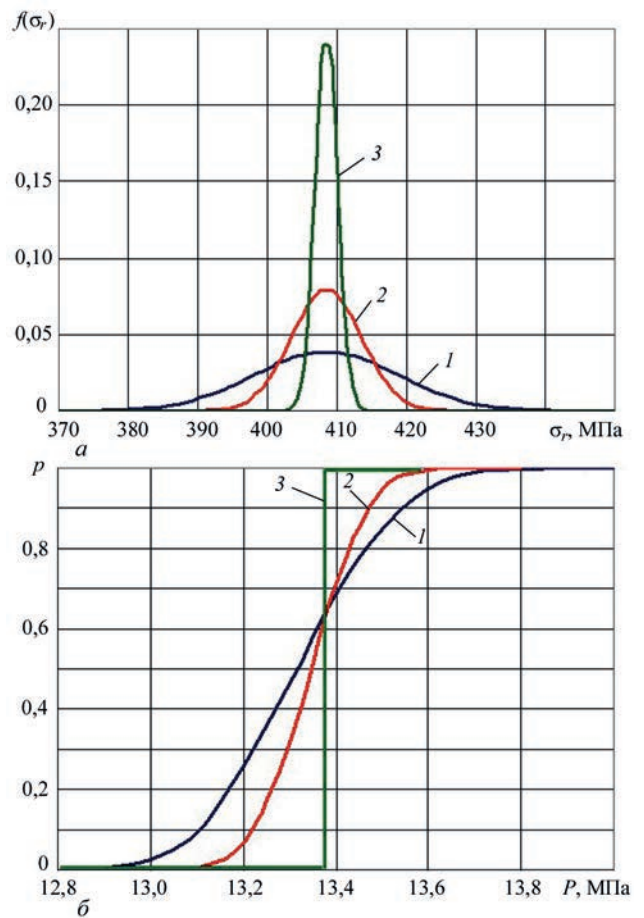


Рис. 5. Плотность нормального распределения значений предела текучести σ_r в зависимости от параметров (см. табл. 2) – а и соответствующие зависимости вероятности разрушения p трубопроводного элемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с внешним коррозионным дефектом ($2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$ мм) от внутреннего давления P – б

Таблица 2. Различные варианты функции пространственного распределения предела текучести в сечении трубопровода (нормальный закон распределения)

Номер варианта	α , МПа	β , МПа
1	408	10,34
2	408	5,05
3	408	1,60

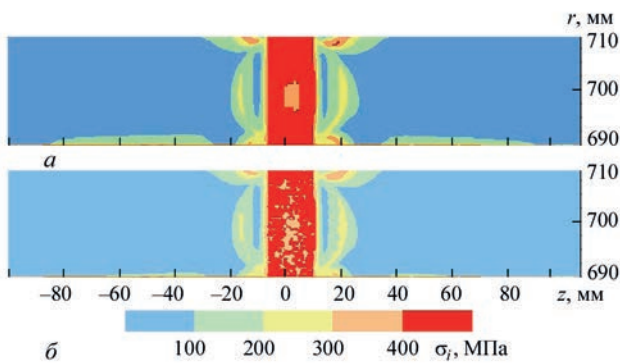


Рис. 6. Примеры распределения интенсивности остаточных напряжений в области кольцевого шва трубопроводного элемента ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У): а – традиционный расчет с постоянными свойствами материала; б – расчет с учетом пространственной неоднородности свойств по методу Монте-Карло

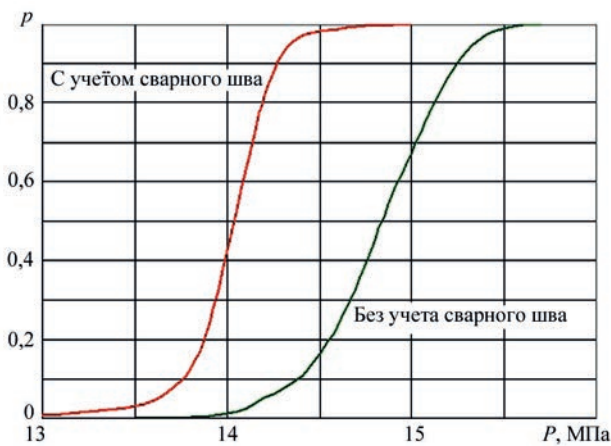


Рис. 7. Влияние кольцевого сварного шва на вероятность разрушения p элемента магистрального трубопровода ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, сталь 17Г1С-У) с поверхностной потерей металла ($2s \times 2c \times a = 20 \times 20 \times 10$ мм)

же меняется (рис. 5, б), угол ее наклона увеличивается, стремясь к 90° , что соответствует функции Хевисайда или детерминированному состоянию.

Как было показано авторами в предыдущих работах [5, 9], в случае расположения дефектов локального утонения стенки на периферии сварных швов (в частности, кольцевых монтажных соединений трубопроводов), их взаимодействие приводит к снижению предельного давления в дефектной трубе. Это обусловлено более высокой жесткостью напряженного состояния в области сварки, что вызывает более интенсивный рост докритической поврежденности по вязкому механизму. Применительно к рассматриваемой задаче, стохастическая пространственная неоднородность материала проявляется как на стадии нагружения ТЭ внутренним давлением, так и при формировании полей остаточных напряжений после сварки (рис. 6). Влияние сварного соединения в этом случае проявляется не только в снижении величины предельного давления, но и в повышении склонности конструкции к разрушению (рис. 7): нали-

чие сварного шва вызывает смещение кривой $p(P)$ вдоль оси давления и увеличивает угол ее наклона в сравнении с трубой без сварного шва.

Выводы

1. На основе принципов термомеханики упругопластической среды наряду с основными закономерностями вязкого разрушения разработаны математические и компьютерные модели совместного развития напряжений, деформаций и докритического повреждения характерных элементов трубопроводов при сварке и дальнейшей эксплуатации. Прямой алгоритм метода Монте-Карло был реализован для учета стохастического пространственного распределения механических свойств материала, таких как предел текучести, напряжение микросколла, параметры склонности к вязкому разрушению и т. д. Для рациональной реализации численных алгоритмов использовались методы параллельных и гибридных вычислений.

2. Показано, что стохастическое распределение свойств материала сварных ТЭ с обнаруженными коррозионными утонениями стенки приводит к значительной локальной нелинейности полей напряжений и деформаций (как остаточных, так и эксплуатационных).

3. На примере элемента магистрального трубопровода с полуэллиптической локальной потерей металла исследованы характерные особенности влияния входных параметров на решение задачи статистической прочности под действием внутреннего давления. Показана удовлетворительная сходимость решения задачи вероятности разрушения с увеличением количества численных экспериментов до репрезентативной выборки. Использование конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния наряду с прогнозированием зарождения и развития докритического разрушения материала по вязкому механизму позволило учитывать как геометрические особенности конструкции, так и полноту входных данных.

Список литературы / References

1. Bjornoy O.H., Marley M.J. (2001) Assessment of corroded pipelines: Past, Present and Future. *Proc. of 11th International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, June 17–22*, 1, 93–101.
2. (2008) ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 *Настанова. Визначення залишкової міцності магистральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Мінрегіонбуд України.
(2008) DSTU-N B V.2.3-21:2008: Directive. Definition of residual strength of main pipelines with defects. Kyiv, Minregionbud Ukraine [in Ukrainian].
3. Bjornoy O. (Ed.). (2004) Recommended Practice, DNV-RP-F101. *Corroded Pipelines*. Hovik, Det Norske Veritas.
4. Milenin O.S. (2017) Numerical prediction of the current and limiting states of pipelines with detected flaws of corrosion wall thinning. *Journal of hydrocarbon power engineering*, 4(1), 26–37.

5. Великоиваненко Е.А., Миленин А.С., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2013) Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая сварка*, **9**, 26–31.
Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2013) Modelling of processes of nucleation and development of ductile fracture pores in welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 24-29.
6. Makhnenko V. (2013) Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding Journal*, **5**, 21–28.
7. Benallal A., Desmorat R., Fournage M. (2014) An assessment of the role of the third stress invariant in the Gurson approach for ductile fracture. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, **47**, 400–414. <https://doi.org/10.1016/j.euro-mechsol.2014.02.009>.
8. Chen Z., Butcher C. (2013) *Micromechanics Modelling of Ductile Fracture*. Netherlands, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6098-1>.
9. Milenin A., Velikoivanenko E., Rozyinka G., Pivtorak N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **171C**, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>.
10. Velikoivanenko E.A., Milenin A.S., Popov A.V. et al. (2014) Methods and technologies of parallel computing for mathematical modeling of stress-strain state of constructions taking into account ductile fracture. *Journal of Automation and Information Sciences* **46(11)**, 23–35. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v46.i11.30>.

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИЯВЛЕНИМИ КОРОЗІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ НА ОСНОВІ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

О.С. Міленін, О.А. Великоиваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Пивторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Гарантування необхідної залишкової міцності та роботоздатності трубопроводів з корозійними дефектами, виявленими при дефектоскопії, передбачає виконання критеріїв граничного стану, які пов'язують властивості матеріалу труб і фактичну геометрію конструкції з системою експлуатаційних навантажень. Одним із шляхів зниження консервативності відповідного експертного аналізу є безпосереднє врахування природного розкиду фізико-механічних властивостей матеріалу. У даній роботі пропонується чисельний підхід статистичного прогнозування граничного стану трубопроводів з дефектами локального стоншення стінки, який базується на розгляді природної просторової неоднорідності властивостей матеріалу (таких як границя текучості, напруження мікроруйнування, початкова концентрація пористості в'язкого руйнування, критичне значення пластичної деформації і т. ін.) в рамках скінченно-елементного описання спільного розвитку напружено-деформованого стану та в'язкого докритичного пошкодження з використанням методу Монте-Карло. Показано, що цей підхід характеризується меншою консервативністю в порівнянні з загальноприйнятими детермінованими методами, які передбачають розгляд однорідних властивостей матеріалу. При цьому статистичний аналіз залишається достатньо точним для розв'язання характерних задач технічної діагностики об'єктів підвищеної небезпеки. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: трубопровід, дефект корозійної втрати металу, граничний стан, ймовірність руйнування, метод Монте-Карло, в'язке руйнування

PREDICTION OF RESIDUAL STRENGTH OF PIPELINE ELEMENTS WITH DETECTED CORROSION DEFECTS BASED ON MONTE-CARLO METHOD

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

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Evaluation of residual strength and performance of pipelines with corrosion defects, found at flaw detection, envisages meeting the limiting state criteria, which correlate the properties of pipe material and actual geometry of the structure with service load system. One of the ways to lower the conservatism of the respective numerical analysis is to directly take into account the natural scatter of physico-mechanical properties of the material. This paper proposes the numerical approach to statistical analysis of the limiting state of pipelines with defects of local thinning of the wall, which is based on consideration of the natural spatial non-uniformity of material properties (such as yield limit, microfracture stress, initial concentration of nuclei porosity of plastic deformation, critical value of plastic deformation, etc.) within the finite-element description of simultaneous development of the stress-strain state and ductile subcritical damage, using Monte-Carlo method. It is shown that this approach is characterized by lower conservatism, compared to generally-accepted deterministic methods, which imply consideration of uniform material properties. Here, statistical analysis remains sufficiently accurate for solving the characteristic problems of technical diagnostics of high hazard facilities. 10 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: pipeline, defect of corrosion loss of metal, limiting state, fracture probability, Monte-Carlo method, ductile fracture

Поступила в редакцію
20.09.2019

Щорічна конференція-виставка
«**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ-2020**»
Травень 2020 р., Київ, «Асоціація «ОКО»
<http://www.ndt.com.ua>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА МЕТОДОМ АЭ СКАНИРОВАНИЯ

С.А. Недосека¹, А.Я. Недосека¹, М.А. Шевцова²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17.

В число композитов, в том числе применяемых все шире в самых различных областях техники, входят, в частности, стеклопластики. Их использование требует разработки надежных неразрушающих методов оценки состояния как в процессе эксплуатации, так и непосредственно после изготовления. Второе имеет не меньшую важность, так как позволяет отбраковать материалы с дефектами еще до того, как из них будут изготовлены элементы конструкций. В данной работе выполнена оценка возможности применения метода акустико-эмиссионного (АЭ) сканирования на базе аппаратуры типа ЕМА для образцов стеклопластика, изготовленного методом ручной выкладки стеклоткани Aeroglass 280 и связующего материала Elan-tech EC157+Elan-tech W152XLR. Выполнена проверка локации координат источников АЭ на ненагруженных образцах. Показано, что исследуемый материал является контролепригодным с точки зрения метода АЭ, позволяет определять координаты источников АЭ с достаточно высокой точностью при тестовом прозвучивании. Проведены многочисленные опыты по сканированию образцов в продольном направлении, при котором каждый из датчиков АЭ поочередно выступал в качестве излучателя тестовых сигналов. Из шести испытанных образцов три содержали встроенный по центру элемент, имитирующий акустический пьезодатчик. Испытания показали, что, используя АЭ сканирование, можно без нагружения образцов отличить их акустические свойства при наличии и отсутствии такого встроенного концентратора и количественно оценить поврежденность материала с концентратором. Отмечена важность полученных результатов для создания методики контроля композитов с применением технологии АЭ сканирования и обеспечения четких критериев оценки поврежденности. Библиогр. 7, рис. 10.

Ключевые слова: композиты, стеклопластик, неразрушающие методы, поврежденности, акустико-эмиссионное сканирование

В рамках международного проекта Aero-UA Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины проводятся АЭ испытания образцов из композитных материалов. В работе [1] показана принципиальная важность таких исследований и приведены результаты для композиционного материала Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564, изготовленных Национальным аэрокосмическим университетом «Харьковский авиационный институт» им. Н.Е. Жуковского. Полученные результаты показали контролепригодность углепластика АЭ методом, достаточно хорошую точность определения координат и возможность выявления дефектов при нагружении образцов. Это говорит о принципиальной возможности применения АЭ технологии для оценки состояния таких материалов и необходимости расширения ее применения на другие классы композитов.

Одной из составляющих АЭ технологии является возможность исследования поврежденности материалов без их нагружения, путем сканирования периодически подаваемыми импульсами, причем в качестве как излучателя, так и приемника может быть использован любой из установленных на образце датчиков АЭ.

В ранее опубликованных работах [2, 3] был предложен критерий оценки поврежденности материалов по результатам АЭ сканирования. АЭ

сканирование представляет собой метод оценки состояния материала, технически во многом подобный ультразвуковому контролю (УЗК), но отличающийся тем, что для сканирования используют АЭ аппаратуру с широкополосными датчиками, а анализ сигналов на выходе проводят аналогично анализу АЭ при стандартных АЭ испытаниях. В отличие от УЗК, это интегральный метод, дающий на выходе не местоположение и размеры дефектов, а общее изменение свойств поврежденного материала по отношению к исходному.

Для определения поврежденности по данным АЭ сканирования требуется сравнение акустических характеристик исходного материала и поврежденного.

Данные, показывающие эффективность сканирования при определении поврежденности, в свое время были получены на образцах из сталей 17ГС, 17Г1С, сталь 20, 09Г2С и ее чешского аналога с длительной наработкой, представляющих трубопроводы из различных регионов Украины, и на образцах из этих же материалов в исходном состоянии – из аварийного запаса. Критерий оценки опасности накопленных в металле конструкций повреждений был представлен в виде $\Delta W_{cp} = 1 - v_{повр} / v_{исх}$, где в качестве акустического параметра, позволяющего оценить степень поврежденности материала, служит характеристика, имеющая смысл скорости нарастания сигнала

до максимума $v = A/R$, где A – амплитуда выходного сигнала; R – время его нарастания до максимума для исходного («исх») и поврежденно-го («повр») материала. Было показано, что если скорость v для наработанного материала меньше, чем для исходного, то в материале возникли необратимые повреждения. Результаты определения поврежденности АЭ сканированием были также подтверждены для стали 12ХНЗМФА в условиях различных динамических перегрузок [4]. Проверка количественных показателей поврежденности, определенных путем АЭ сканирования, выполнена несколькими физическими методами [5], в том числе прямым взвешиванием малых проб в жидкости. В результате построена обобщенная модель накопления повреждений, связывающая их с данными АЭ испытаний на разрушение и АЭ сканирования [6]. Отметим, однако, что все представленные выше исследования относились к металлическим материалам, свойства композитов с применением АЭ авторами ранее, до работы [1], не изучались.

Механические свойства стеклопластика из стеклоткани Aeroglass 280 и связующего материала Elan-tech EC157+Elan-tech W152XLR:

Модуль упругости в направлении основы ткани E_1 , ГПа.....	18
Предел прочности при растяжении в направлении основы ткани F_{1p} , МПа.....	317
Модуль упругости в направлении утка ткани E_2 , ГПа.....	28,0
Предел прочности при растяжении в направлении утка ткани F_{2p} , МПа.....	530



Рис. 1. Внешний вид образцов в состоянии поставки (на верхнем обозначено место установки имитатора пьезодатчика – по центру образца)

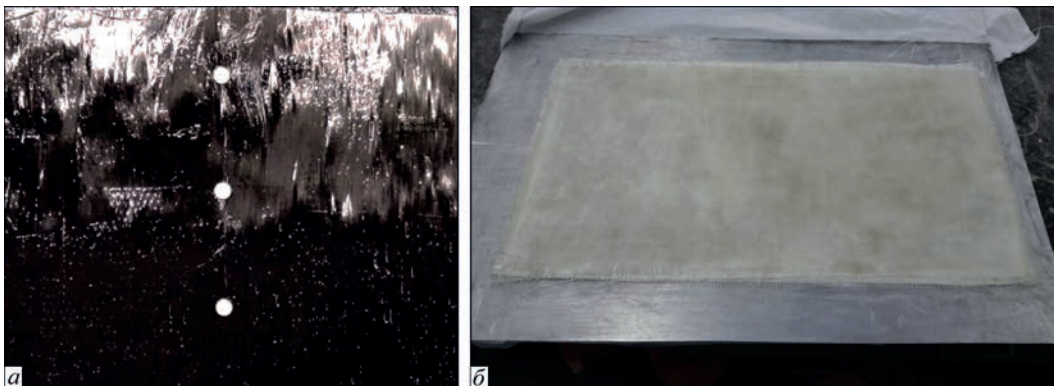


Рис. 2. Установка имитаторов сенсорных пьезодатчиков (показано на углеволокне, аналогично выполнено для стеклоткани) (а) и сборка пакета из стеклоткани для пропитки (б)

Первоначальная цель исследования заключалась в определении принципиальной тестируемости этого композиционного материала с использованием датчиков, оборудования и АЭ технологий, реализованных с использованием приборов *EMA-4* [5] (рис. 1).

Исследуемые образцы стеклопластика, изготовленные Национальным аэрокосмическим университетом «Харьковский авиационный институт» им. Н.Е. Жуковского, представляли собой тонкие продольные полосы, размером $400 \times 35 \times 2,1$ мм.

Образцы изготовлены методом ручной выкладки стеклоткани Aeroglass 280 и связующего материала Elan-tech EC157+Elan-tech W152XLR (пропорция смешивания 100:30). Формование производилось на плоской дюралюминиевой плите вакуумным методом с пропиткой под вакуумом сухой заготовки из стеклоткани Aeroglass 280 и установленными предварительно имитаторами сенсорных датчиков, выполненных из карбоната кальция $CaCO_3$ толщиной 0,5 мм и диаметром 5 мм. Давление формования 0,09 МПа. Температурно-временной режим формования после пропитки: 60 °С в течение 6 ч. Образцы с требуемыми размерами вырезались из отформованной плиты алмазным диском.

Датчики размещали на небольшом расстоянии от края образца, так что образовали линейную локационную антенну полной длиной 330 мм (рис. 4). При установке третьего датчика он размещался по центру образца (в случае наличия имитатора пьезодатчика – прямо над ним).

Опыты показали, что исследуемый материал обладает высокой акустической чувствительностью, не худшей, чем у углепластика [1]. Возможность определения координат сигналов была обеспечена с достаточной точностью. Излучаемый сигнал прямоугольной формы имел следующие параметры: амплитуда 3 В, частота 60 кГц, длительность 7 мкс. При принятии датчиком сигнала, который мало подвергся искажениям, получали осциллограмму, подобную показанной на рис. 5, а, при изменении параметров сигнала чаще всего осциллограмма имела вид, подобный показанному на рис. 5, б.

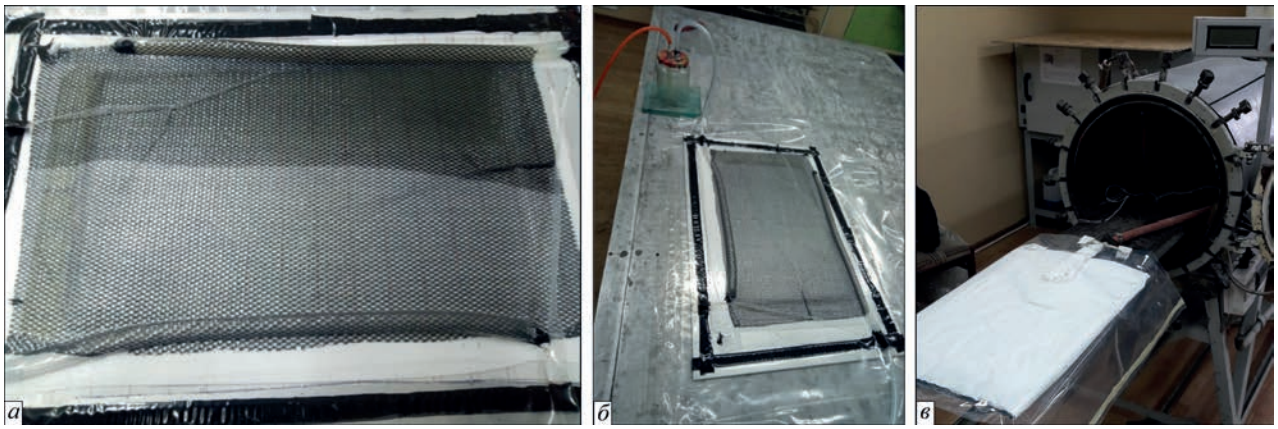


Рис. 3. Пропитка связующим пакета под вакуумом (а, б) и отверждение образцов в печи (в)

При определении местоположения источников АЭ с использованием датчиков в качестве генератора волн, скорости волн АЭ в материале подбиралась таким образом, чтобы расчетные координаты сигналов АЭ, излученных датчиками, а затем принятых АЭ прибором, максимально точно совпали с координатами датчика-излучателя.

Поскольку образцы прозвучивали только в одном из направлений – продольном, эффект анизотропии не проявлялся. Добиться точного попадания координат зарегистрированных сигналов АЭ в центры, размещенные под датчиками АЭ (рис. 6), удалось, задав скорость 3 мм/мкс в направлении X , соответствующем продольному направлению пластины.

Отметим, что в программе ЕМА-3.9 [7], которая использовалась при испытаниях, центры акустической активности, объединенные в кластеры, показаны флажками, цвет которых отображает ам-

плитуду последнего вошедшего в кластер события АЭ, а число рядом с флажком показывает сколько событий АЭ попало в кластер.

Представленные опыты неоднократно повторяли, и результаты их обработки показали, что, во-первых, данный материал является контролепригодным с точки зрения АЭ, и, во-вторых, обеспечивает необходимую точность определения координат источников АЭ. Интересным моментом представляется незначительная погрешность при определении координат нескольких источников АЭ сигналов в том случае, когда датчики 1 и 3 выступали в качестве генератора (см. рис. 6). Для данного образца такая картина наблюдалась несколько раз и, вероятно, связана со скосом короткой стороны пластины при ее изготовлении, что можно заметить, в частности, на рис. 1, нижний образец.

Переходя к собственно АЭ сканированию, отметим, что данный метод требует, во-первых, высокой аккуратности при прикреплении датчиков к поверхности образца, во-вторых, многократного повторения испытаний, поскольку каждый раз существует возможность, что акустическая волна, излученная одним из датчиков, будет двигаться по образцу иным образом, и показатели, используемые для определения поврежденности, будут неверными.

Для обеспечения корректности результатов сканирования используется несколько критериев. Прежде всего, в рамках каждого единичного испытания параметры принятых датчиком сигналов должны быть стабильными, без существенного разброса. При использовании в качестве приемников поочередно двух датчиков, расположенных по разным сторонам образца, полученные ими данные также не должны иметь существенных отличий в параметрах.

В рамках данной работы для получения необходимой статистики стабильных результатов было проведено около ста экспериментов на шести образцах, три из которых имели по центру встроенный ими-

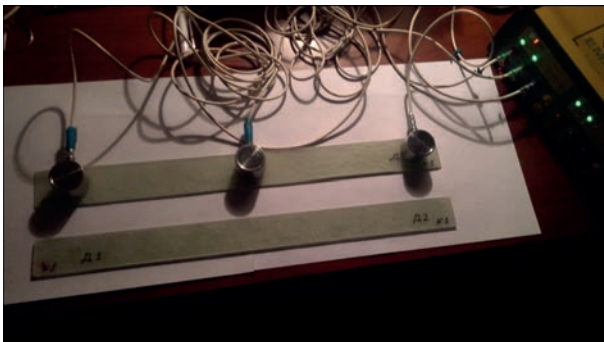


Рис. 4. Датчики АЭ на образце и подключенный к ним 16-ти канальный прибор ЕМА-4

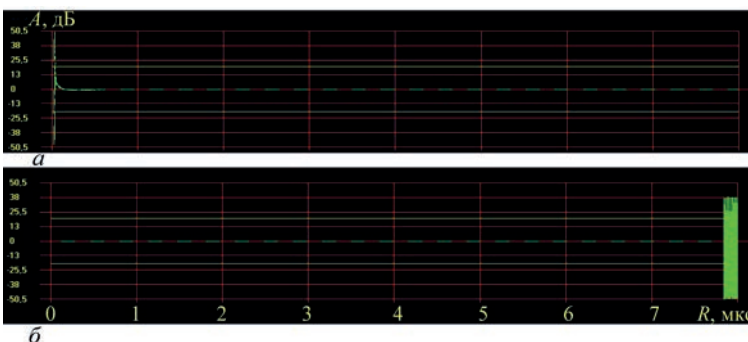


Рис. 5. Типовые осциллограммы сигналов АЭ, принятых датчиками в различных случаях (описание а, б см. в тексте)

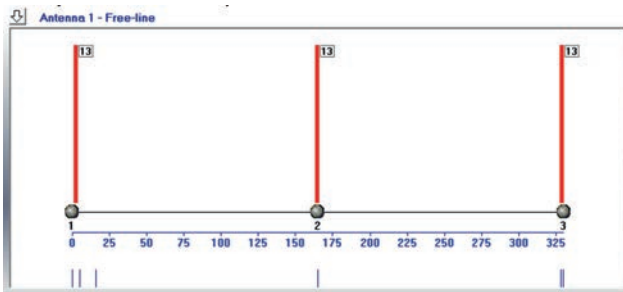


Рис. 6. Результаты поочередного прозвучивания образца без концентратора встроенными в датчики генераторами акустических сигналов. Видна высокая точность определения координат, центры акустической активности показаны флажками и совпадают с местами расположения датчиков АЭ

татор пьезодатчика диаметром 5 мм, близкого по ряду свойств к используемому в реальных пьезодатчиках материалу ЦТС19.

Прежде всего были проведены опыты, в которых на образце были установлены только два датчика на расстоянии 330 мм, и шесть раз один из датчиков являлся излучателем, а второй приемни-

ком, а затем наоборот. Каждое такое испытание по АЭ сканированию записывалось в отдельный файл, затем выполняли статистическую обработку всей полученной информации. Всего, таким образом, получили данные в 72 файлах.

Типичные графики результатов АЭ сканирования трех образцов без встроенного имитатора пьезодатчика представлены на рис. 7. В левой колонке графики для случая, когда излучателем выступал датчик 1, в правой колонке – датчик 2. Столбиками показаны в зависимости от времени (t , с) принятия сигнала АЭ амплитуды A , точками – время их нарастания до максимума R_t . При обработке измерений применяли программные фильтры, отсекающие заведомо некорректные данные (например, $R_t = 0$ мкс).

Как видим, полученные результаты достаточно стабильны. Хотя для разных образцов и при разных направлениях сканирования есть некоторая разница в полученных значениях амплитуд A и вре-

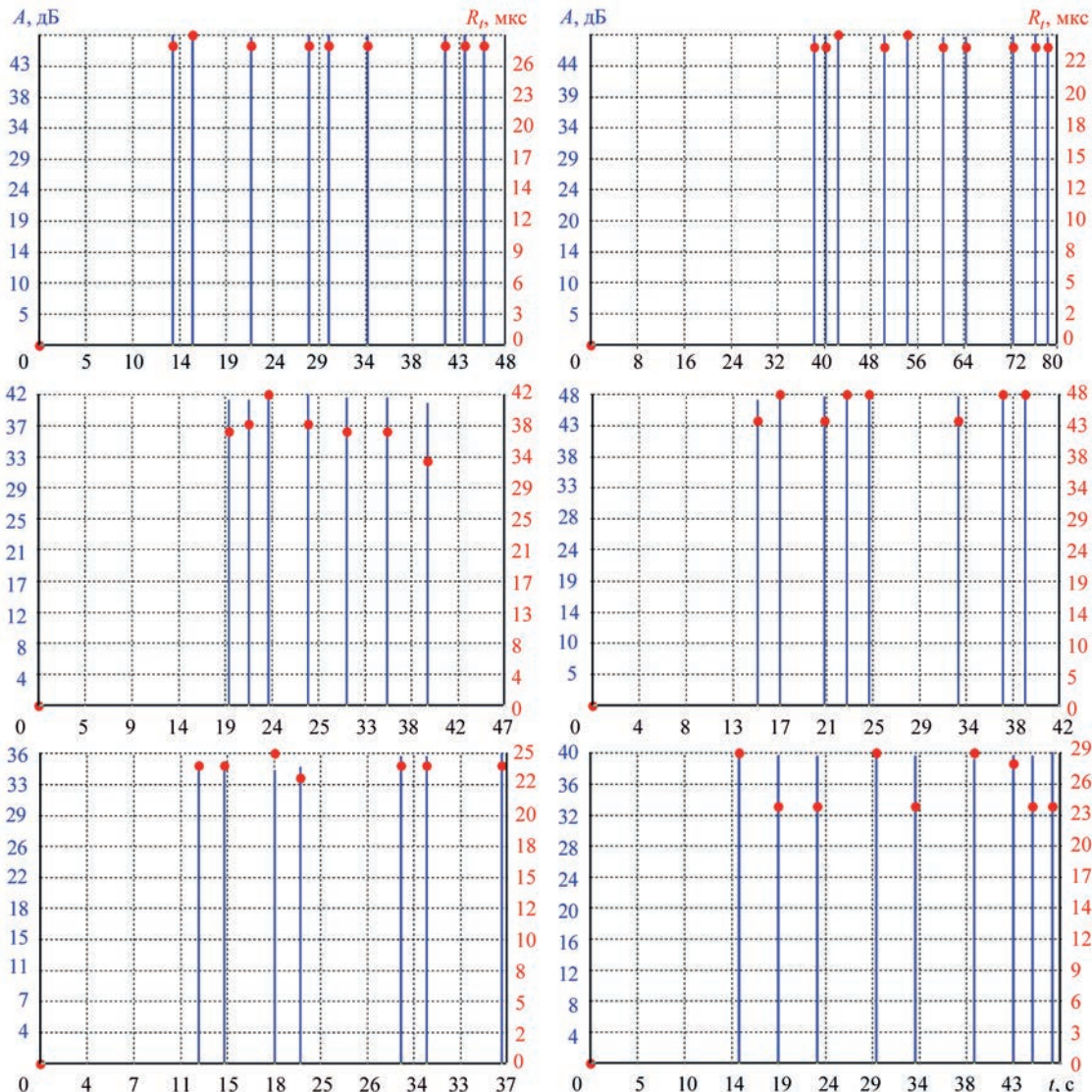


Рис. 7. Результаты АЭ сканирования образцов без встроенного имитатора пьезодатчика. Столбики – амплитуды принятых сигналов A , точки – время их нарастания до максимума R_t (описание см. в тексте)

мен нарастания сигнала R_p , в рамках каждого конкретного эксперимента их повторяемость высокая. Отметим, что минимальная амплитуда составляет 36 дБ, максимальное значение R_t – 48 мкс.

Далее будет показано, что эти параметры для образцов с имитатором пьезодатчика меняются таким же образом, как показано было ранее для других материалов – амплитуда принятого сигнала в поврежденном материале снижается, а время нарастания R_t увеличивается. Характерным для данного материала является несущественное, близкое к статистическому разбросу, снижение амплитуд принятых сигналов в поврежденном материале при значительном росте R_t .

В каждом конкретном испытании четко видно, что полученные значения амплитуд принятых АЭ сигналов A имели меньший разброс, чем время их нарастания до максимума R_t . Такое явление связано, вероятнее всего, с тем, что сканируемый материал имеет неоднородную, слоистую струк-

туру. Даже при отсутствии внутренних дефектов особенности структуры могут приводить к изменению формы сигнала, не влияя при этом на его мощность, выражаемую амплитудой.

Типичные графики результатов АЭ сканирования трех образцов со встроенным имитатором пьезодатчика приведены на рис. 8. В левой колонке, как и на рис. 7, представлены графики для случая, когда излучателем выступал датчик 1, в правой колонке – датчик 2.

Далее будет показано, что внесение в материал концентратора – встроенного имитатора пьезодатчика – приводит к еще более существенному разбросу параметра R_t при довольно стабильном значении амплитуд принятых датчиками сигналов.

Из графиков видно, что амплитуды принятых сигналов АЭ практически не изменились, за исключением падения максимального значения до 28 дБ в образце № 1 при сканировании его сигналами от датчика 1. Там же (правый график в верхнем ряду, рис. 8) видно,

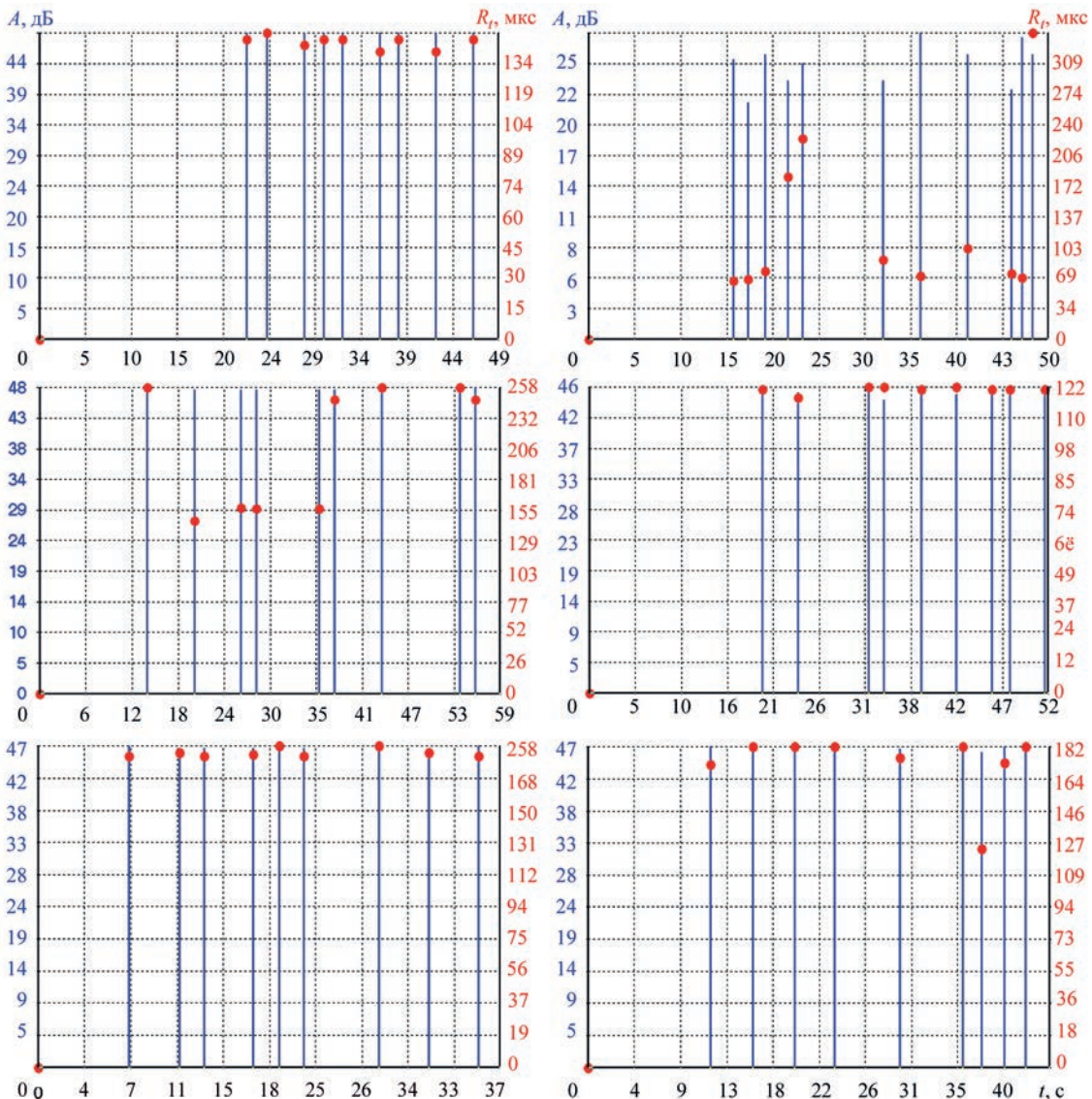


Рис. 8. Результаты АЭ сканирования образцов со встроенным имитатором пьезодатчика. Столбики – амплитуды принятых сигналов A , точки – время их нарастания до максимума R_t (описание см. в тексте)

что разброс значений R_f весьма существенен. Это характерно для всех шести случаев прозвучивания сигналами от датчика 1. Учитывая максимальное из всех зафиксированных значений для данной серии экспериментов $R_f = 507$ мкс, можно утверждать, что это наиболее поврежденный образец.

Что касается параметра R_f в целом, то для всех образцов со встроенным имитатором пьезодатчика он существенно вырос. Кроме того, существенно увеличился разброс параметра R_f . Этот факт можно трактовать таким образом, что повреждение материала, создаваемое встроенным концентратором круглой формы и относительно небольшого диаметра, в меньшей степени ослабляет сигнал, чем затрудняет его дальнейшее движение по материалу. Вероятнее всего, изменяется траектория сигнала, что, в свою очередь, приводит к переотражениям от стенок образца, что как само по себе, так и в условиях слоистой структуры материала, приводит к достаточно стохастическому изменению формы сигнала.

Для расчета поврежденности образцов с имитатором пьезодатчика в качестве исходных данных использовали параметры АЭ, полученные при сканировании образцов без имитаторов пьезопластин с тем же номером. Теоретически их можно было менять местами в любом порядке, поскольку они вырезаны из одного и того же листа материала, а осредненные данные отличаются несущественно.

Данные были обработаны в программе MS Excel. Для каждого образца были получены в слу-

чае каждого из направлений прозвучивания значения A и R_f , затем скорости нарастания амплитуд $v = A/R_f$, рассчитана поврежденность в каждом конкретном случае сканирования, обозначенная на рис. 8 как $\Delta W 1 \rightarrow 2$ для сканирования образца № 2 сигналами от датчика 1, $\Delta W 2 \rightarrow 1$ для сканирования образца № 1 сигналами от датчика 2, и далее по аналогии. Далее рассчитано среднее значение поврежденности $\Delta W_{cp} = 1 - v_{повр} / v_{исх}$ для каждого из направлений сканирования.

На графиках рис. 9 над цифрами 1...6 оси абсцисс показаны значения поврежденности для каждого эксперимента, над цифрой 7 находится и выделен другим цветом столбик со средним значением поврежденности ΔW_{cp} для испытания в целом.

Анализ представленных на рис. 8 и 9 данных показывает, во-первых, высокую поврежденность всех трех образцов со встроенными имитаторами пьезодатчиков, которая для отдельных серий сканирования образцов колеблется от 0,65 до 0,95. Во-вторых, наиболее поврежденным представляется образец № 1, для которого зафиксировано самое высокое значение средней поврежденности при сканировании от датчика 2, и, помимо этого, наблюдается весьма большой разброс измеренных данных, что было отмечено для верхнего правого графика на рис. 8, что говорит о неравномерности свойств сканируемого материала в данном направлении.

Теоретически, при последующих испытаниях на растяжение, вплоть до разрыва, картина АЭ

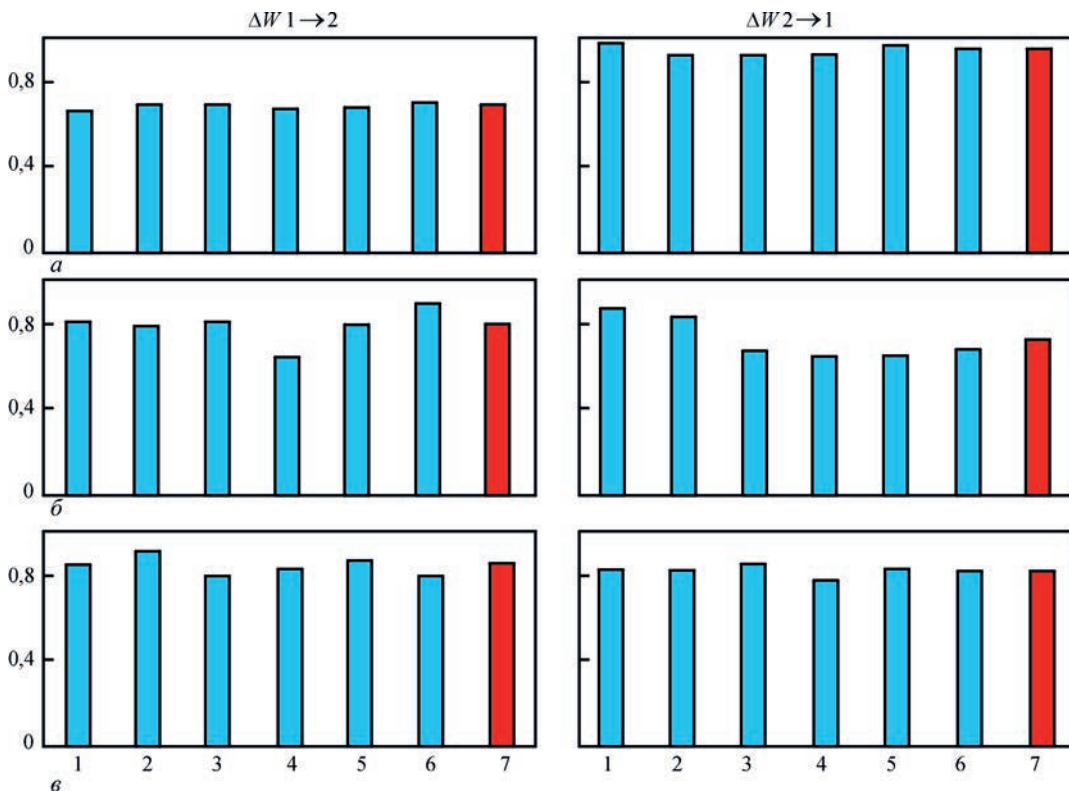


Рис. 9. Результаты расчета поврежденности образцов со встроенным имитатором пьезодатчика по данным АЭ сканирования: а – образец № 1; б – 2; в – 3 (описание см. в тексте)

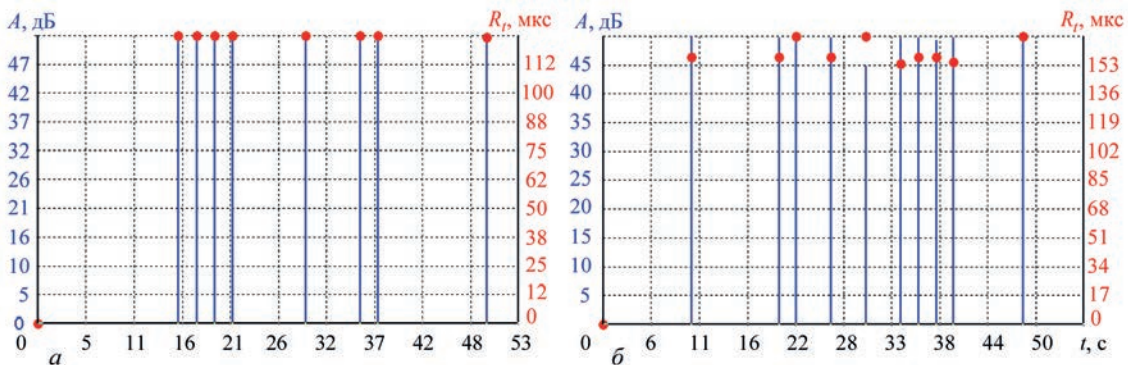


Рис. 10. Типовые результаты АЭ сканирования образцов из исходного материала (а) и со встроенным имитатором пьезодатчика (б) при размещении излучателя по центру образца. Столбики – амплитуды принятых сигналов A , точки – время их нарастания до максимума R_p

должна существенно отличаться в сторону увеличения числа событий АЭ для образцов со встроенными имитаторами пьезодатчиков. Также должны фиксироваться места наибольшей АЭ активности в области имитаторов, поскольку они являются концентраторами напряжений.

Помимо представленных опытов, были проведены достаточно показательные исследования в другой постановке, когда датчик-излучатель 3 располагался по центру образца (в случае наличия имитатора пьезодатчика – непосредственно над ним, как показано на рис. 4). На рис. 10 видно, насколько отличаются события АЭ, сформированные по результатам сканирования образцов со встроенными имитаторами пьезодатчиков (рис. 10, б) от таковых для образцов из исходного материала, без концентраторов (рис. 10, а).

На рис. 10, а значения A и R_p для всех событий практически одинаковы, на рис. 10, б – имеется определенный их разброс. Амплитуды АЭ в поврежденном материале несколько меньше, время нарастания сигналов R_p , напротив, большие, что полностью соответствует предшествующим теоретическим и экспериментальным исследованиям.

Тем не менее, если рассчитать по этим данным поврежденность, то она будет значительно ниже, чем для случая, когда излученная волна АЭ прошла весь образец, включая и поврежденную имитатором пьезодатчика область, и в данном примере составляет $\Delta W_{cp} = 0,29$. Причина этого понятна – волна, излученная по центру образца, создается встроенной в датчик-излучатель пьезопластиной, диаметр которой составляет 13 мм, вследствие чего наиболее поврежденная область – встроенная пластина диаметром 5 мм – практически не влияет на результаты эксперимента, так как находится под датчиком-излучателем. Значение же поврежденности $\Delta W_{cp} = 0,29$ можно трактовать как поврежденность материала образца со встроенным имитатором пьезодатчика вне зоны установки этого имитатора.

Приведенный пример говорит, в частности, о том, насколько важны как правильная постановка

эксперимента, включая расположение датчиков, так и трактовка полученных результатов.

Выполненные эксперименты говорят, с одной стороны, о высокой чувствительности систем АЭ контроля для выполнения сканирования стеклопластика и достаточно высокой повторяемости результатов, с другой стороны, необходимости проведения серий из относительно большого числа экспериментов с целью обеспечения достоверности результатов.

Одним из важнейших результатов проведенных экспериментов является подтверждение разработанной ранее модели накопления повреждений [2–6] и возможность распространения ее на стеклопластики.

Таким образом, имеется принципиальная возможность применения АЭ сканирования для контроля состояния исследованного материала без его нагружения, но каждый конкретный материал и конфигурация сканируемого образца или конструктивного элемента требуют достаточно длительной настройки параметров сканирования и высокой аккуратности при проведении измерений.

Что касается создания методики применения АЭ сканирования на практике при контроле конструкций из композитных материалов подобного типа, требуется получение более обширного набора статистических данных с целью определения оптимальных параметров настройки контролирующей аппаратуры и условий проведения контроля.

Выводы

1. Исследованные образцы из стеклопластика, изготовленные методом ручной выкладки стеклоткани Aeroglass 280 и связующего материала Elan-tech EC157+Elan-tech W152XLR, являются контролепригодными с точки зрения метода АЭ, позволяют определять координаты источников АЭ с достаточно высокой точностью при тестовом прозвучивании и проводить АЭ сканирование с использованием АЭ аппаратуры типа ЕМА.

2. Используя в качестве эталона исходный, без повреждений, материал, можно при помощи толь-

ко АЕ сканування без нагрівання оцінювати стан склопластика з пошкодженнями. Це дає можливість, в частині, відбракувати негідний по своїм властивостям матеріал безпосередньо після виготовлення.

3. АЕ сканування дозволяє визначити, пошкоджений чи матеріал з вбудованим концентратором типу круглого п'єзодатчика, і розрахувати ступінь пошкодження.

4. Критерій пошкодження ΔW_{cp} може бути використаний для склопластика так само, як і для металевих матеріалів.

5. Незважаючи на розрахунок пошкодження як скалярного параметра, вона також може бути розглянута як вектор, залежний від напрямку, в якому досліджується пошкоджуваність матеріалу.

6. Створення методики застосування методу АЕ сканування на практиці при контролі композитних матеріалів в стадії розробки і конструкцій з цих матеріалів вимагає отримання більш широкого набору статистичних даних з метою встановлення оптимальних параметрів налаштування контролюючої апаратури і умов проведення контролю.

Список літератури

1. Недосека С.А. і др. (2018) Акустична емісія при випробуванні композитних матеріалів. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 4, 36–40.
2. Лебедев А.А. і др. (1995) Модель накоплення пошкоджень в металевих матеріалах при статичному розтягненні. *Проблеми міцності*, 7, 31–40.

3. Лебедев А.А. і др. (2001) Оцінка пошкодження металевих діючих газопроводів методом АЕ сканування. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 1, 8–12.
4. Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Пилипенко А.П. (2004) Комплексна оцінка пошкодження пластичних матеріалів при різних режимах навантаження. *Там же*, 3, 16–21.
5. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексна оцінка пошкодження і залишкового ресурсу металів з експлуатаційною наработкою. *Там же*, 1, 9–16.
6. Патон Б.Е. і др. (2012) *Акустична емісія і ресурс конструкцій*. Альбом. Київ, Індром.
7. Недосека А.Я. і др. (2013) Програмне забезпечення систем АЕ діагностики ЕМА-3.9. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 3, 16–22.

References

1. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Shevtsova, M.A. et al. (2018) Acoustic emission at composite material testing. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 36–40 [in Russian].
2. Lebedev, A.A. et al. (1995) Model of damage accumulation in metallic materials under static tension. *Problemy Prochnosti*, 7, 31–40 [in Russian].
3. Lebedev, A.A., Nedoseka, A.Ya., Chausov, N.G., Nedoseka, S.A. (2001) Evaluation of the degree of damage of the active gas pipeline metal by the scanning method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 8–12 [in Russian].
4. Chausov, N.G., Nedoseka, S.A., Pilipenko, A.P. (2004) Integrated evaluation of damage of ductile materials under different loading modes. *Ibid.*, 3, 16–21 [in Russian].
5. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Ibid.*, 1, 9–16 [in Russian].
6. Paton B.E. et al. (2012) *Acoustic emission and service life of structures*: Album. Kiev, Indprom.
7. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 16–22 [in Russian].

ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ СКЛОПЛАСТИКА МЕТОДОМ АЕ СКАНУВАННЯ

С.А. Недосека¹, А.Я. Недосека¹, М.А. Шевцова²

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

У число композитів, в тому числі які застосовуються все ширше в самих різних галузях техніки, входять, зокрема, склопластики. Їх використання вимагає розробки надійних неруйнівних методів оцінки стану як в процесі експлуатації, так і безпосередньо після виготовлення. Друге має не меншу важливість, так як дозволяє відбракувати матеріали з дефектами ще до того, як з них будуть виготовлені елементи конструкцій. У даній роботі виконана оцінка можливості застосування методу акустико-емісійного (АЕ) сканування на базі апаратури типу ЕМА для зразків склопластику, виготовленого методом ручної викладки склотканини Aeroglass 280 і сполучного матеріалу Elan-tech EC157 + Elan-tech W152XLR. Виконано перевірку локації координат джерел АЕ на ненавантажених зразках. Показано, що матеріал, який досліджувався, є контролепригодним з точки зору методу АЕ, дозволяє визначати координати джерел АЕ з досить високою точністю при тестовому прозвучу. Проведено численні дослідження по скануванню зразків в подовжньому напрямку, при якому кожен з датчиків АЕ по черзі виступав в якості випромінювача тестових сигналів. З шести випробуваних зразків три містили вбудований по центру елемент, що імітує акустичний п'єзодатчик. Випробування показали, що, використовуючи АЕ сканування, можна без навантаження зразків відізнати їх акустичні властивості при наявності та відсутності такого вбудованого концентратора і кількісно оцінити пошкодженість матеріалу з концентратором. Відзначено важливість отриманих результатів для створення методики контролю композитів із застосуванням технології АЕ сканування та забезпечення чітких критеріїв оцінки пошкодження. Бібліогр. 7, рис. 10.

Ключові слова: композити, склопластик, неруйнівні методи, пошкодження, акустико-емісійне сканування

DETERMINATION OF FIBERGLASS DAMAGE BY THE METHOD OF AE SCANNING

S.A. Nedoseka¹, A.Ya. Nedoseka¹, M.A. Shevtsova²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

²N.E. Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». 17 Chkalov Str., 61070, Kharkiv, Ukraine.

Fiberglasses belong to composite materials, including those ever wider used in the most diverse engineering fields. Their application requires development of the most reliable methods of nondestructive testing for structure state assessment, both in service and directly after fabrication. The second is not less important, as it allows rejecting materials with defects, even before they are used for manufacturing structural elements. This work provides an assessment of applicability of the method of acoustic-emission (AE) scanning on the base of EMA type equipment for samples of fiberglass made by the method of manual laying of glass fabric Aeroglass 280 and binder Elan-tech ECW157 + Elan-tech W152XLR. Checking of the location of AE source coordinates on unloaded samples was performed. It is shown that the studied material is controllable by AE method, and allows determination of AE source coordinates with sufficient accuracy at test sounding. Numerous experiments on scanning the samples in the longitudinal direction have been performed, when each of AE transducers alternatively acted as test signal emitter. From six tested samples three contained an element built-in in the center, which simulated an acoustic piezo transducer. Testing showed that using AE scanning allows differentiating between the acoustics properties of the samples without loading them, in the presence and absence of such a built-in concentrator, and quantitatively assessing the damage of the material with the concentrator. The importance of obtained results for development of a procedure for control of composites with application of AE scanning technology and providing precise criteria of damage assessment is noted. 7 Ref., 10 Fig.

Keywords: composites, fiberglass, nondestructive methods, damage, acoustic emission scanning.

Поступила в редакцію
29.05.2019

МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ПРОФЕСІОНАЛІВ



19-22 травня 2020 р. відбудеться Міжнародна конференція молодих професіоналів «Young Professionals International Conference on Welding and Related Technologies YPIC and WRTYS 2020» під егідою Міжнародного інституту зварювання.

З 2001 р. Міжнародна конференція «Зварювання та споріднені технології» – WRTYS (Welding and Related Technologies on Young Scientists), головним організатором якої є Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, стала головним місцем зустрічі українських та зарубіжних молодих спеціалістів в галузі зварювання, металургії та матеріалознавства. У 2017 р. успішно була проведена 9-та Міжнародна конференція WRTYS 2017.

У 2014 р. Угорським зварювальним товариством було започатковано захід для молодих спеціалістів в області зварювання під назвою YPIC (Young Professional International Conference) – Міжнародна конференція для молодих професіоналів. Даний захід проходить щорічно і вже встиг побувати в Угорщині, Німеччині та Франції.

У 2020 р. Україна є країною організатором 6-ої Міжнародної конференції YPIC 2020 та традиційної ювілейної 10-ої Міжнародної конференції молодих спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» WRTYS 2020. Міжнародний інститут зварювання об'єднує ці конференції в спільний міжнародний науковий захід «YPIC and WRTYS 2020».

Організатори конференції: Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Рада молодих вчених ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Громадська організація «Віртус», Посольство Франції в Україні та Представництво Польської академії наук у м. Києві.

Теми конференції:

- Передові технології зварювання та з'єднання матеріалів
- Нові структурні та функціональні матеріали, наноматеріали, композити
- Адитивні технології
- Моделювання процесів та матеріалів
- Інноваційні технології та процеси в металургії
- Неруйнівний контроль та якість зварних з'єднань
- З'єднання полімерів та адгезивні технології
- Механіка руйнування
- Здоров'я, безпека та довкілля

Запрошуємо прийняти участь в роботі Міжнародної конференції молодих професіоналів «YPIC and WRTYS 2020» 19-22 травня 2020 р. Місце проведення: Київська обл., с. Мощун, вул. Лісова, 1, готельний комплекс «Пуца Лісова».

За більш детальною інформацією звертатися на офіційний сайт конференції: www.ypic2020.com та e-mail: office@wrtys.com.ua

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсиенко

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

Рассмотрены условия, в которых работают элементы паровых котлов, причины возможных аварий на барабанах котлов тепловых станций, методы проведения контроля и оценки их технического состояния. Представлена технология диагностирования барабана котла с использованием метода акустической эмиссии. Проанализированы результаты внедрения данной технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга барабана котла ТГМ-96. Библиогр. 13, рис. 9.

Ключевые слова: барабан котла, акустическая эмиссия, акустико-эмиссионная технология, мониторинговые системы, оценка состояния конструкций

Теплоэнергетический комплекс (ТЭК) играет особо важную роль в экономике любой страны. Без его продукции практически невозможно функционирование всех отраслей. Важное место в энергетическом секторе занимают тепловые электростанции, в которых используется органическое топливо: газ, мазут, уголь. Успешная эксплуатация данных объектов энергетики зависит от множества факторов: срок эксплуатации; режим эксплуатации; рабочая среда; своевременность и качество оценки состояния материала конструкций; проведение объективного технического диагностирования; выполнение ремонтов; замена комплектующих и др. [1–4].

Рассмотрим факторы обеспечения безопасной эксплуатации объектов на примере барабанов паровых котлов (рис. 1). Большая часть отечественного парка барабанов котлов (85...90 %) выработала парковый ресурс, поэтому актуальной задачей является обоснованное продление паркового ресурса барабанов [5].

Барабан парового котла является одним из наиболее ответственных его элементов, в котором аккумулируется большое количество тепловой энергии. Барабан котла предназначен для сбора и раздачи рабочей среды, для отделения пара от воды, очистки пара, обеспечения запасов остаточной воды в котле. Условия, в которых работают элементы паровых котлов во время эксплуатации, чрезвычайно разнообразны и сложны, так как металл находится одновременно под воздействием высоких температур, механических напряжений и агрессивной среды, в результате чего в металле могут возникнуть изменения структуры и механических свойств, явления ползучести, коррозия, что может привести к его разрушению [6].

Разрушение барабана котла в процессе эксплуатации – серьезная проблема, которая влечет за собой значительные материальные затраты на ре-



Рис. 1. Внешний вид барабана котла ТГМ-96

монт и восстановление объекта, создает тяжелые производственные проблемы.

К факторам риска можно отнести: конструкционно-технологические (качество изготовления листов, сварки корпуса, сварки внутрибарабанных устройств, термическая обработка, коэффициент запаса прочности) и эксплуатационные (режимы эксплуатации, водно-химический режим, гидроиспытания) [7].

В настоящее время оценка работоспособности барабанов котлов осуществляется преимущественно с помощью расчетных алгоритмов, которые не учитывают изменения структурного состояния продолжительно работающего металла, а также процессы зарождения и накопления структурной поврежденности. Первоочередной становится задача совершенствования методов оценки ресурса основного и наплавленного металла барабанов котлов высокого давления на основе применения инструментальных методов контроля. Концепция, основанная на прогнозировании и предупреждении, получает все более широкое распространение вместо используемой концепции выявления и устранения [8]. Независимо от причин возникновения аварий, их последствия могут быть очень серьезными. Поэтому для обеспечения надежной эксплуатации конструкций актуальным становится именно непрерывный контроль их работоспособности и прогнозирование ее на период времени, необходимый для предотвращения возможных аварийных ситуаций.

Вопросы диагностики и мониторинга технического состояния объектов ТЭК заслуживают отдельного рассмотрения [9]. Выполнение различных нормативных документов требует при освидетельствовании и продлении ресурса барабанов котлов проведения ряда мероприятий, некоторые из которых выполнить без ущерба для конструкции довольно сложно, например, вырезать образцы для проведения исследований. Требования нормативных документов стимулируют разработку новых подходов к решению текущих проблем, разработки новых современных технологий и методов контроля за состоянием конструкции.

Для неформального решения комплексной проблемы по оценке состояния барабана котла ТГМ-96

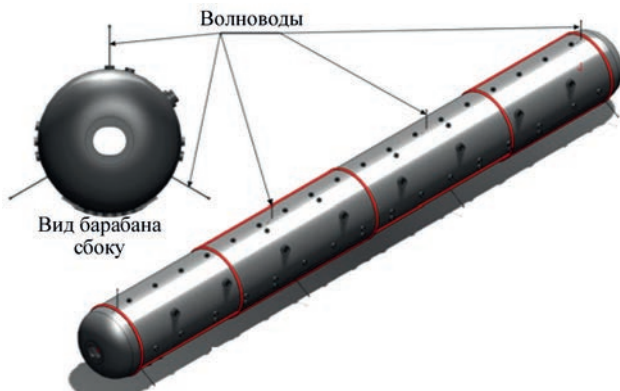


Рис. 2. Размещение волноводов (датчиков АЭ) на поверхности объекта

(водотрубный котел с природной циркуляцией) и продления его реального ресурса специалистами ИЭС и КП «Киевтеплоэнерго» предложена технология акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга состояния материала корпуса барабана котла, 100 % контроля поверхности барабана и сварных врезок трубопроводов в его корпус. Предварительно проведен анализ материалов по особенностям эксплуатации барабанов котлов, изучена техническая документация на объект АЭ мониторинга и свойства материала барабана котла (сталь 16ГНМА), проведены опытно-экспериментальные работы на объекте: разработаны схемы размещения датчиков АЭ, проведен АЭ контроль на различных этапах эксплуатации объекта, разработаны технические требования к системе АЭ мониторинга барабана котла ТГМ-96 и ее составляющим.

Характеристики объекта контроля приведены ниже.

Краткая техническая характеристика барабана котла

Рабочее давление, кг/см²:

в барабане	156
на выходе из пароперегревателя	140
Рабочая температура перегретого пара, °С.....	570
Продуктивность, т/ч	480
Рабочая среда	Перегретый пар
Материал.....	Сталь 16ГНМА
Диаметр (вн.); длина (цил.), мм.....	1700; 17700
Толщина, мм.....	114...118
Год изготовления.....	1969

Учитывая специфику работы барабана котла (высокие избыточное давление и температура) для получения информации с объекта возникла необходимость обеспечить стабильную длительную работу датчиков сигналов АЭ, обоснованно выбрать количество и схему размещения датчиков на волноводах на поверхности контролируемого объекта. После проведения предварительных исследований акустических характеристик объекта определено необходимое количество датчиков АЭ для проведения мониторинга – на поверхности барабана котла установлено 12 датчиков АЭ с использованием волноводов (рис. 2).

Уточненная схема размещения датчиков представлена на рис. 3, фото датчика на волноводе – рис. 4. На базе установленных датчиков могут

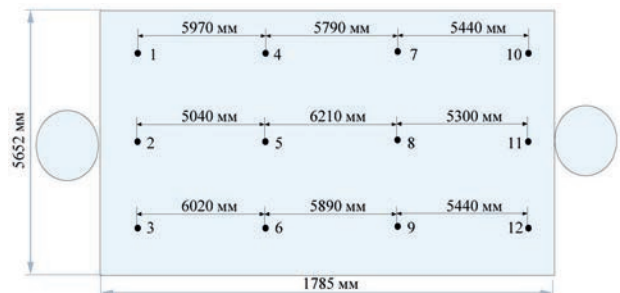


Рис. 3. Уточненная схема размещения датчиков АЭ (1–12) на объекте

быть сформированы различные локационные антенны (зонные, линейные, цилиндрические) для регистрации зон повышенной АЭ активности и локализации возможных дефектов.

Основные задачи АЭ мониторинга – обеспечение безопасной эксплуатации барабана котла в штатном режиме [10], своевременное обнаружение и регистрация АЭ зон, которые могут свидетельствовать о наличии дефектов различной природы происхождения (от изменения свойств материала конструкций до развивающихся трещин), определение координат мест повышенной АЭ активности, определение динамики их изменения, выдача рекомендаций для дальнейшей эксплуатации объекта контроля, а также определение участков, где необходимо провести дополнительный контроль другими неразрушающими методами. Диагностирование производится согласно действующим нормативным документам.

На фото (рис. 5) приведен общий вид приборной части системы АЭ мониторинга. Прибор установлен в специальном защитном шкафу в соответствии с требованиями техники безопасности. Внешний вид экрана монитора системы при работе в штатном режиме эксплуатации объекта показан на рис. 6, при проведении АЭ контроля объекта при выходе на рабочий режим эксплуатации – на рис. 7.



Рис. 4. Датчик АЭ на волноводе



Рис. 5. Система АЭ мониторинга EMA-3

Программное обеспечение (ПО) системы АЭ диагностирования [11] анализирует поступающую информацию и выдает предупреждения в случае возникновения опасности в реальном режиме времени. На рис. 7 показано, что система АЭ мониторинга выдала предупреждения первого уровня (желтый цвет) и предупреждение второго уровня (красный цвет) с выдачей прогнозных оценок нагружения объекта. Информация о выдаче системой предупреждений разного уровня опасности и прогнозных оценок за весь период мониторинга объекта позволяет своевременно проанализировать параметры работы объекта и не допустить возникновения аварийных ситуаций. Эта информация хранится в специальных файлах и доступна для просмотра и детального анализа за любой период наблюдения. В качестве примера проанализируем данные за период с 01.01.2017 по 01.01.2019 (рис. 8).

Представленный график (рис. 8) показывает периоды повышенной акустической активности. Цвет и высота столбца соответствуют уровню предупреждения об опасности [11]. Желтый цвет – обратить внимание на текущее состояние объ-

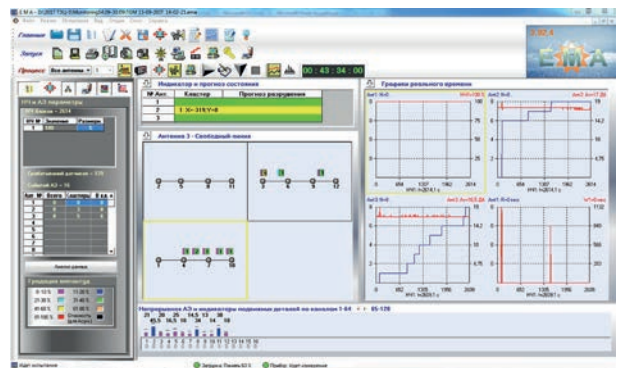


Рис. 6. Вид экрана АЭ мониторинга в рабочем режиме



Рис. 7. Результаты АЭ контроля объекта при выходе на рабочий режим (описание см. в тексте)

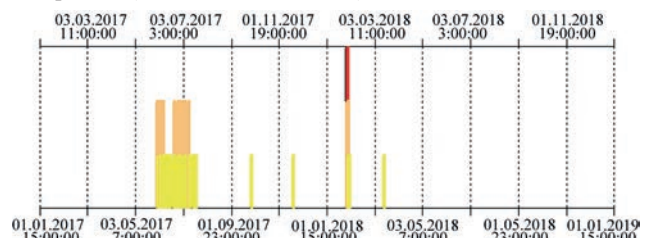


Рис. 8. Выдача системой АЭ мониторинга предупреждений разного уровня опасности (описание см. в тексте)

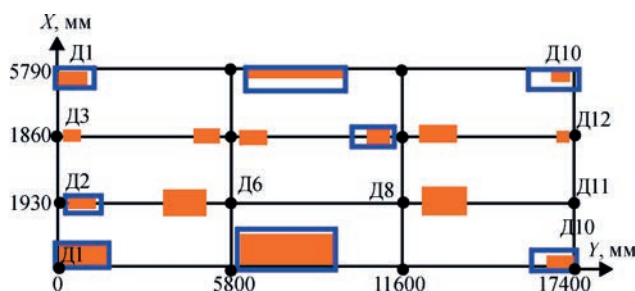


Рис. 9. Зоны повышенной АЭ активности

екта; оранжевый – повысит внимание; красный означает опасность и предполагает, в зависимости от особенностей работы объекта, изменение технологических параметров его эксплуатации.

На представленном графике можно видеть предупреждения всех трех уровней и время их регистрации системой. Это позволяет сопоставить возникающие предупреждения с особенностями технологических процессов.

По результатам проводимого АЭ мониторинга барабана котла определены зоны повышенной АЭ активности для последующего их контроля другими неразрушающими методами (рис. 9).

Опыт проведения работ по АЭ мониторингу потенциально опасных объектов [12, 13] и анализ информации, полученной с данного объекта, позволили создать методику непрерывного АЭ мониторинга барабана котла ТГМ-96 и подтвердили эффективность применения разработанной технологии его диагностирования с использованием метода АЭ.

Выводы

1. Разработанная и апробированная на потенциально опасном объекте – барабане котла – технология АЭ мониторинга позволила проводить техническое диагностирование объекта на рабочих параметрах эксплуатации, своевременно принимать решение о его техническом состоянии, предотвращать возможные аварийные ситуации на объекте, проводить дополнительный контроль в местах, указанных системой АЭ мониторинга, что значительно уменьшает возможные простои оборудования, затраты и время на проведение ремонтных работ и оценку качества их выполнения, сокращает количество гидроиспытаний барабана котла.

2. Проведение непрерывного АЭ мониторинга барабана котла ТГМ-96 позволяет накапливать, анализировать и оценивать динамику изменения статистических данных о наиболее опасных участках объекта контроля и режимах эксплуатации, когда возникает наибольшая опасность для его функционирования, и своевременно информировать об этом специалистов предприятия с целью повышения безопасности эксплуатации барабана котла.

3. Рекомендуем технологию непрерывного АЭ мониторинга для оценки технического состояния

барабанов котлов ТГМ-96 и аналогичных промышленных объектов.

Список литературы

- (1996) ДНАОП 0.00-1.26-96 *Правила будови і безпечної експлуатації парових котлів з тиском пари не більше 0,07 МПа (0,7 кгс/см²), водогрійних котлів і водопідігрівачів з температурою нагріву води не вище 115 °С*. Київ.
- (2012) НПАОП 0.00-1.60-66 *Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов*. Харьков, ФОРТ.
- (2004) СО 15334.17.442-2003 *Инструкция по порядку продления срока службы барабанов котлов высокого давления*. Москва, ЦПТИ ОРГРЭС.
- Антикайн П.А., Зыков А.К. (1985) *Эксплуатационная надежность объектов котлонадзора*. Справочник. Москва, Metallurgy.
- Гонтаровский П.П., Протасова Т.В., Глядя А.А., Пожидаев А.В. (2013) Оценка термонапряженного состояния барабана котла ТГМЕ-464. *Проблемы машиностроения*, 16, 1, 44–51.
- Абабков Н.В. (2011) *Совершенствование технологии оценки ресурса сварных барабанов котлов с применением акустических и магнитных методов* : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.01.10.
- Гринь Е.А. (2009) *Повреждаемость барабанов котлов из стали 16ГНМ*. Москва, Технический комитет по надежной и безопасной работе ТЭС.
- Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–18.
- Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. *Там же*, 3, 7–14.
- Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2014) Об управлении безопасностью эксплуатации оборудования, несущего рабочую нагрузку. Непрерывный акустико-эмиссионный мониторинг. *Хімічна промисловість України*, 1, 10–21.
- Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3-9. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 16–22.
- Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: теория, методы, технологии, средства, применение*: альбом. Киев, Индпром.
- Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсиенко М.А. (2018) Применение технологии акустико-эмиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 34–41.

References

- (1996) DNAOP 0.00-1.26-96: *Rules of construction and safe operation of steam boilers with steam pressure of not more than 0.07 MPa (0.7 kgf/cm²), and hot water boilers and water heaters with water heating temperature not high than 115 °C*. Kyiv [in Ukrainian].
- (2012) NPAOP 0.00-1.60-66: *Rules for design and safe operation of steam and hot water boilers*. Kharkiv, FORT [in Russian].
- (2004) SO 15334.17.442-2003: *Instructions on how to extend the life of drums of high pressure boilers*. Moscow, TsPTI ORGRES [in Russian].
- Antikajin, P.A., Zykov, A.K. (1985) *Safe operation of boiler supervision facilities*: Refer. book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Gontarovskiy, P.P., Protasova, T.V., Glyadya, A.A., Pozhidaev, A.V. (2013) Evaluation of thermal stressed state of drum of TGME-464 boiler. *Problemy Mashinostroeniya*, 16(1), 44-51 [in Russian].

6. Ababkov, N.V. (2011) *Improvement of the technology for evaluation of service life of welded drums of boilers with application of acoustic and magnetic methods*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tekh. Sci. Degree [in Russian].
7. Grin, E.A. (2009) *Damageability of drums of 16GNM steel boilers*. Moscow, Technical Committee for Reliable and Safe Operation of TPPs [in Russian].
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Intelligent technologies in evaluation of the state of structures (AE technology and new generation controlling instrumentation based on it). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3–18 [in Russian].
9. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2014) On application of AE technology at continuous monitoring of piping of power units operating at high temperature. *Ibid.*, **3**, 7–14 [in Russian].
10. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2014) On management of safe operation of equipment under working load. Continuous acoustic emission monitoring. *Khimichna Promyslovist Ukrainy*, **1**, 10–21 [in Russian].
11. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 16–22 [in Russian].
12. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) *Acoustic emission and service life of structures: Theory, methods, technologies, means, application*. In: Album. Kiev, Indprom [in Russian].
13. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2018) Application of the technology of acoustic emission monitoring at evaluation of the condition of vessels in chemical production. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 34–41 [in Russian].

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

А.Я. Недосєка, С.А. Недосєка, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко

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

Розглянуто умови, в яких працюють елементи парових котлів, причини можливих аварій на барабанах котлів теплових станцій, методи проведення контролю і оцінки їх технічного стану. Представлена технологія діагностування барабана котла з використанням методу акустичної емісії. Проаналізовано результати впровадження даної технології безперервного акустико-емісійного моніторингу барабана котла ТГМ-96. Бібліогр. 13, рис. 9.

Ключові слова: барабан котла, акустична емісія, акустико-емісійна технологія, моніторингові системи, оцінка технічного стану конструкцій

MODERN TECHNOLOGIES FOR EQUIPMENT DIAGNOSIS IN THERMAL POWER COMPLEX

A.Ya. Nedoseka, S.A. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Operating conditions of steam boiler elements, causes for possible accidents in drums of thermal power plants, and methods of control and assessment of their technical condition are considered. Technology of diagnosing a boiler drum using acoustic emission method is presented. Results introducing this technology of continuous acoustic-emission monitoring of the drum of TGM-96 boiler have been analyzed. 13 Ref, 9 Fig.

Keywords: boiler drum, acoustic emission, acoustic-emission technology, monitoring systems, structure state assessment

Поступила в редакцію
15.03.2019

23–28 марта 2020 г.

Ассоциация технологов-машиностроителей Украины совместно с
Грузинским техническим университетом

в г. Тбилиси (Грузия) проводит

20-й Международный научно-технический семинар

СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ (M20-1)

Тематика семинара

- Современные тенденции развития технологии машиностроения
- Подготовка производства как основа создания конкурентоспособной продукции
- Состояние и перспективы развития заготовительного производства
- Совершенствование технологий механической и физико-технической обработки в машино- и приборостроении
- Упрочняющие технологии и покрытия
- Современные технологии и оборудование в сборочном и сварочном производстве
- Ремонт и восстановление деталей машин в промышленности и на транспорте, оборудование для изготовления, ремонта и восстановления
- Стандартизация, сертификация, технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами изделий машино- и приборостроения
- Внедрение стандартов ДСТУ ISO 9001:2015 в промышленности, высших учебных заведениях, медицинских учреждениях и органах государственной власти.
- Метрология, технический контроль и диагностика в машино- и приборостроении
- Экологические проблемы и их решения в современном производстве

Организационный комитет: www.atmu.net.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБ НИЖНЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ЧАСТИ КОТЛОВ ТПП-210А, ПОСЛЕ ПЕРЕХОДА НА СЖИГАНИЕ ГАЗОВОГО УГЛЯ

А.В. Грузевич^{1,2}, Д.А. Дереча^{2,3}

¹Трипольская ТЭС. 08720, Киевская область, Обуховский р-н, г. Украинка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины. 03142, г. Киев, бульв. Акад. Вернадского 36-б

³НТУУ «КПИ имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 57.

На сегодняшний день в тепловой энергетике сложилась чрезвычайно тяжелая ситуация, связанная с прекращением поставок антрацитового штыба на тепловые электростанции. В связи с этим одной из основных задач в современной теплоэнергетике является техническое перевооружение ряда ТЭС проходящее с изменением проектного вида топлива антрацитового штыба и их переход на сжигание газовых углей марки Г. Поэтому исследование эксплуатационной надежности труб нижней радиационной части котлов после перехода на сжигание газовой группы углей является весьма актуальным вопросом. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 2.

Ключевые слова: энергетическое оборудование, поверхности нагрева, экранные трубы, коррозия, окалина, надежность, котлы, теплоэлектростанция

Надежность и долговечность работы энергетического оборудования в значительной степени зависит от состояния поверхностей нагрева котлоагрегатов. Статистика повреждаемости на электростанциях показывает, что подавляющее большинство вынужденных остановов котлов вызвано повреждением труб поверхностей нагрева. Значительная часть разрывов труб поверхностей нагрева происходит в результате высокотемпературной газовой коррозии металла [1]. В настоящее время отмечается весьма значительная газовая коррозия экранных труб нижней радиационной части (НРЧ) котлов высокого и сверхкритического давления, сжигающих сернистое твердое топливо. Разрывы труб НРЧ из-за коррозионных повреждений являются одной из основных причин аварийных остановов блоков мощностью 300 МВт, работающих на твердом топливе.

Наружная поверхность труб подвергается коррозионному воздействию со стороны обращенной в топку, в зоне максимальной температуры факела. Разрушение происходит в зоне наибольшей тепловой нагрузки экранов [2]. Разрушению подвержены преимущественно трубы средней по ширине части топки, непосредственно над зажигательным поясом.

В целях обеспечения надежной работы НРЧ необходимо разработать методику контроля, которая будет включать определение мест возможного утонения стенки трубы, вид и периодичность их контроля, а так же учитывать изменения структуры в процессе эксплуатации.

Анализ работы энергетического оборудования. Учитывая опыт эксплуатации пылеугольных кот-

лов ТПП-210А при работе их на разных видах топлива проведен анализ и выявлено влияние (зависимость) рабочих сред на интенсивность износа и изменение микроструктуры металла поверхностей нагрева НРЧ.

Комплексная оценка ресурса труб НРЧ, основана на использовании анализа фактического состояния металла и условий его эксплуатации.

На первой очереди Трипольской ТЭС установлены четыре пылеугольных котла ТПП-210А, каждый из которых представляет собой прямоточный двухкорпусный агрегат в симметричном исполнении. Производительность каждого корпуса 475 т/ч, $P = 25,5$ МПа, температура пара 545...545 °С, топливо на блоках № 1, 2 уголь марки АШ (антрацитового штыба) или смесь углей АШ и Т (тощий) на блоках № 3, 4 уголь марки Г (газовый), растопочное топливо – мазут М-100.

Топочная камера разделена пережимом на камеру горения и догорания. Общее тепловое напряжение топочного объема составляет около $146 \cdot 10^3$ ккал/м³·ч, камеры горения $460 \cdot 10^3$ ккал/м³·ч [3].

Камеры горения на блоках № 1, 2, 4 экранированы трубами размером $\varnothing 42 \times 6$ и $\varnothing 38 \times 6$ мм из стали 12Х1МФ, а на блоке № 3 камера горения экранирована трубами размером $\varnothing 32 \times 6$ мм из той же марки стали. Трубы ошпированы и покрыты карборундовой массой. На каждом корпусе установлены шесть цилиндрических комбинированных пылегазовых горелок. Горелки расположены в один ярус – по три на фронтальной и задней стенках.

Блоки введены в эксплуатацию: блок № 1 – в 1969 г.; блоки №№ 2–4 – в 1970 г.

Котлоагрегаты № 1, 2 работают на угле марки АШ со средними фактическими показателями

$Q = 5100...5600$ ккал/кг, котлоагрегаты № 3, 4 после технического перевооружения на угле марки Г ($Q = 5200...5500$ ккал/кг).

Избыток воздуха в топках котлов № 1, 2 поддерживался на уровне 1,25...1,35, в топках котлов № 3, 4 – на уровне 1,1...1,15. Распределение воздуха по горелкам хорошее. Присосы в топке 4...7 %.

С учетом опыта эксплуатации других станций компании ПАО «Центрэнерго» поиск газовой коррозии на Трипольской ТЭС был целенаправлен. Работниками лаборатории металлов проводится постоянный осмотр всех поверхностей нагрева согласно требований [4] и в особенности труб НРЧ.

В настоящее время существует ряд методов расчетной оценки величины износа на поверхностях нагрева [5]. Однако при реализации этих методов можно получить различные результаты вследствие того, что фактические условия работы узлов энергооборудования могут значительно отличаться от расчетных по температуре, уровню напряжений и других технологических параметрах.

В связи с этим, в данной работе рассмотрена динамика изменения толщины стенки НРЧ при прямых замерах в зависимости от используемого топлива. Для анализа надежности работы поверхностей так же определяли микроструктуру труб после эксплуатации на различных марках топлива. Оба параметра определяют долговечность работы НРЧ.

Опыт использования котлов со сверхкритическими параметрами свидетельствуют о том, что, если в первый год эксплуатации повреждения труб поверхностей нагрева происходят в основном из-за дефектов металлургического и технологического производства, то после 8...10 тыс. ч эксплуатации надежность котлоагрегата зависит от уровня эксплуатационных характеристик металла и конструктивных особенностей того или иного узла.

После замены НРЧ блока № 1 газовая коррозия на боковых панелях обнаруживается уже после 11987 ч эксплуатации в районе лазов боковой стенки. На отдельных участках коррозия достигала 3 мм, т. е. 50 % толщины стенки трубы.

Участки трубы, где толщина стенки в результате коррозии была меньше номинальной более чем на 10 %, были вырезаны и заменены новыми:

Корпус 1А

левая сторона — 21 участок труб;
правая сторона — 14 участков труб.

Корпус 1Б

левая сторона — 23 участка труб;
правая сторона — 15 участков труб.

Всего по блоку заменено новыми трубами 73 участка. На фронтowych, задних и подовых экранах

газовой коррозии не было обнаружено. Наиболее интенсивная газовая коррозия наблюдалась на уровне оси горелок выше и ниже в районе лазов – в местах наброса факела на боковые стенки, а также в местах разрушенной карборундовой обмазки.

Перед текущим ремонтом корпус 1А длительное время работал с низкими избытками воздуха; совместно с пылью на обоих корпусах. Коррозия боковых панелей НРЧ корпуса 1Б осталась в пределах осмотра в текущий расширенный ремонт. В последующие остановы блока после 14106 и 14808 ч соответственно, было отмечено увеличение газовой коррозии на отдельных участках. В останов после 16589 ч работы на корпусе 1Б обнаружены трубы с повреждением газовой коррозией до 40...60 % толщины стенки трубы.

Для лабораторных исследований была предоставлена вырезка трубы № 43 отметка 13 м левого бокового экрана $\varnothing 38 \times 6$ мм НРЧ после 18735 ч.

При внешнем осмотре образцов механических повреждений наружной и внутренней поверхностей не выявлено.

Наружная поверхность трубы покрыта окалиной бурого цвета, толщина окалины составляет $S_{ок} \approx 0,2$ мм. На наружной поверхности, со стороны обмуровки, выявлены мелкие язвыны диаметром до 2 мм и глубиной до $h = 0,5$ мм.

Внутренняя поверхность образца покрыта отложениями черного цвета.

Толщина стенки образца составляет:

- огневая сторона $S_{ст} = 5,3$ мм;
- тыльная сторона $S_{ст} = 5,6$ мм.

Диаметры образца в двух взаимоперпендикулярных направлениях (лоб-тыл; бок-бок) составляют 36,9 и 37,4 мм, соответственно.

При проведении оптико-эмиссионного анализа на спектрометре PMI-MASTER были выявлены легирующие элементы представленные в табл. 1.

Механические испытания проводились на схождение сторон и на определение механических свойств металла.

При проведении технологических испытаний на схождение сторон (сплющивание) трещин, надрывов не выявлено.

При проведении механических испытаний на определение предела прочности были получены результаты и отображены в табл. 2.

При проведении металлографического анализа исследования проводились по всему периметру трубы с увеличением 100 и 500.

Структура металла трубы № 43 практически идентична по всему периметру (рис. 1) и состоит из зерен феррита, перлита и карбидов и со-

Таблица 1. Состав металла образца (сталь 12Х1МФ)

Номер образца	Содержание легирующих элементов, мас. %								
	Fe	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	P	S
1	97,0	0,036	0,83	0,25	0,20	0,36	0,53	0,004	0,004

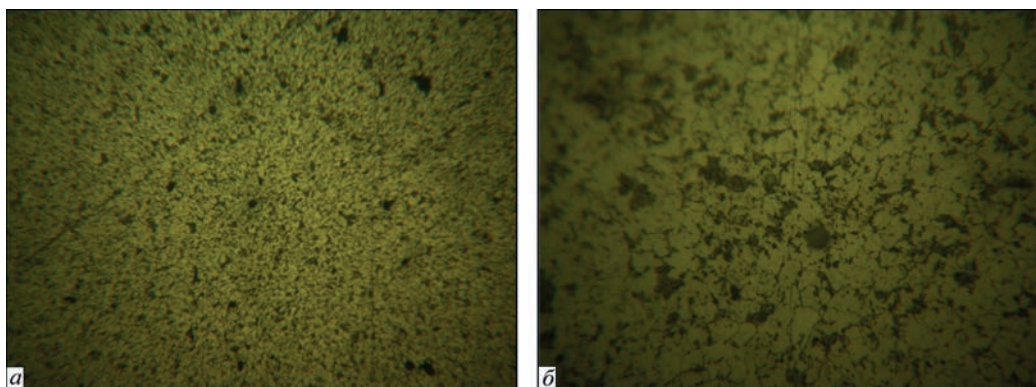


Рис. 1. Микроструктура труб НРЧ из стали марки 12X1MФ: а – $\times 100$; б – $\times 500$

ответствует баллу 5 (приложение «В» «Шкалы микроструктур котельных труб из стали марок 12X1MФ, 12X1MФ – ПВ, 15X1M1Ф и 12X2MФСР» к ТУ 14-3-60:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 (обязательное). Границы зерен четкие. Зерна перлита рыхлые.

Характер газовой коррозии на блоке № 2 тот же, что и на блоке № 1. Впервые после замены коррозии обнаруживается после 11977 ч эксплуатации на корпусе 2Б ($S_{\min} = 4$ мм, т. е. 33,3 %) на 11 трубах.

На корпусе 2А в период капитального ремонта после 8870 ч эксплуатации на котле проведены вырезки труб НРЧ и подового экрана, т. е. в предполагаемых местах наиболее интенсивной коррозии. Следов коррозии не обнаружено. После 12588 ч эксплуатации была обнаружена коррозия на 18 трубах боковых панелей ($S_{\min} = 3$ мм, т. е. 50 %). В останов блока № 2 после 19819 ч эксплуатации на корпусе 2А (левая боковая стенка) обнаружена газовая коррозия с утонением стенки до 4,5...5,0 мм на 7 участках труб.

Места наиболее интенсивной газовой коррозии находятся на боковых панелях НРЧ и отображены на рис. 2.

Корпусам А и Б блока № 3 проведена реконструкция НРЧ с последующим переводом на сжигание угля марки Г. На корпусах 4-го блока после перевода на сжигание угля марки Г в расширенный текущий ремонт после 9042 ч работы явных очагов газовой коррозии не обнаружено.

Анализ микроструктуры исследуемых материалов проводился на вертикальном металлографическом микроскопе МЕТАМ в световом поле при прямом освещении. Микроструктура хромомолибденованадиевых сталей 12X1MФ в процессе эксплуатации при сжигании углей марки Г оценивалась по шкале остаточных и браковочных структур ТУ. При изучении свойств предоставленных

Таблица 2. Механические характеристики образцов труб

σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
479,5	24,5	72,6
По требованиям ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.		
441...637	21	55

образцов (сталь 12X1MФ) привлекает вопрос закономерных связей структуры и свойств металла. Результаты сопоставления микроструктуры и механических свойств представлены в табл. 3.

Механические свойства и микроструктура стали в обоих случаях остаются в пределах нормы.

Как видно из изложенного выше, при сжигании твердых топлив (АШ, Т) в зоне горения происходит интенсивная коррозия экранных труб.

Поиск газовой коррозии на блоках Трипольской ТЭС начали проводить уже через 5...6 тыс. ч эксплуатации. Для измерения толщины стенки трубы на ТЭС используют серийные толщинометры (ТУЗ-1), применяемые для контроля толщины стенки в диапазоне 2...6 мм.

При замере осуществляется прямой отсчет; точность измерения $\pm 0,1$ мм. Специальной подготовки трубы не требуется, достаточно очистить трубу и зачистить участки диаметром 10...15 мм до $R_z = 120...150$ для установки датчиков. Метод дефектации, предложенный работниками лаборатории, достаточно точен и высокопроизводителен.

В результате обобщения опыта эксплуатации установлены места и периодичность контроля труб нижней радиационной части.

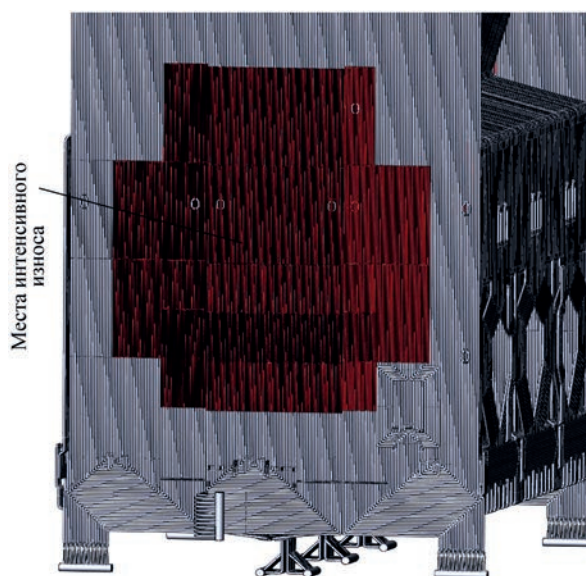


Рис. 2. Камера горения котла ТПП 210А

Таблица 3. Данные по сопоставления микроструктуры и механических свойств

Результаты механических испытаний			Металлографические испытания		
σ_B , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, ψ , %	Микроструктура	Тип структуры по шкале, балл	Микрповреждаемость по СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, балл
Образец – сталь 12Х1МФ					
556	35,5	74,7	Феррит, плотная промежуточная фаза, отдельные карбиды и их цепочки на границах зерен	4, 5	2, 3
Требования ТУ 14-3-460 для стали 12Х1МФ при $T = 20^\circ\text{C}$					
441...637	≥ 21	≥ 55	Ф + П	Допустимые 1-5	Не должен превышать 5

Некоторые мероприятия по снижению газовой коррозии на станции решены или находятся в стадии выполнения. Достигнуто хорошее распределение воздуха по горелкам. Систематическое уплотнение топок позволяет получать присосы не более 4...7%. Для ликвидации набросов факела на боковые панели НРЧ возможен вариант разворота крайних горелок к центру топки на угол 10...16°. На станции проводятся мероприятия, направленные на усовершенствование системы подачи и регулирования воздуха по горелкам, улучшение равномерности подачи пыли. Эти мероприятия предусматривают также совершенствование аэродинамики топки для наилучшего перемешивания топлива с воздухом и ликвидации набросов факела на стенки топки, улучшения качества защитного пояса, снижения температуры стенок труб и др.

Систематический водно-химический контроль обеспечивает режим блоков в пределах «Правил технической эксплуатации». Установлено, что газовая коррозия наблюдается в местах, где разрушена карборундовая обмазка, а поэтому необходимо увеличить ее устойчивость. На станции повышают устойчивость зажигательного пояса в результате соблюдения технологии нанесения набивки карбида кремния на ошпированную поверхность. Для снижения температуры стенок труб рекомендуются и внедрены на Трипольской ТЭС эксплуатационные кислотные промывки через 6 тыс. ч работы корпусов.

Выводы

Не обнаружено существенных изменений в микроструктуре металла НРЧ после перехода на сжигание угля марки Г на фоне снижение газовой коррозии боковых панелей НРЧ.

Видно, что газовая коррозия идет в местах разрушения карборундовой набивки, поэтому необходимо увеличить ее устойчивость.

Основным результатом исследований мест коррозии и микроструктур металла труб, выполненного на котельных агрегатах ТПП-210А после их перевода на сжигание топлива марки Г является, что основным коррозионноактивным компонентом пылеугольного факела при сжигании топлива является газообразная фаза и при такой организации процесса сжигания газового угля в

пристенной зоне она является менее агрессивной чем при АШ. Однако повреждения экранов на этих котлах не были полностью устранены, они имели место на подовом экране НРЧ, тогда как в варианте при зжигании АШ они концентрировались исключительно на боковых экранах.

В процессе эксплуатации должен быть организован тщательный и планомерный контроль состояния труб НРЧ в местах вероятной коррозии. Толщину стенки труб определять путем замера толщины стенки ультразвуковыми толщиномерами и путем контрольных вырезов. Замеры проводить не менее одного раза в год. По результатам проведенной толщинометрии и определения состояния металла на вырезках труб НРЧ в текущие ремонты разрабатывать мероприятия по предупреждению газовой коррозии, перспективные графики замены.

Список литературы

1. Злепко В.Ф., Воронов Н.П. (1975) Исследование свойств металла труб поверхностей нагрева в условиях эксплуатации. *Эксплуатационная надежность металла энергооборудования*. Труды ВТИ. Москва, «Энергия», сс. 16–24.
2. Мейкляр М.В. (1961) *Как работает металл парового котла*. Москва, Государственное энергетическое издательство.
3. (1979) *Инструкция по эксплуатации блоков 300 МВт с прямоточным котлом ТПП-210 «А» и турбиной К-300-240*. г. Украинка.
4. (2005) СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004» *Контроль металу та продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій*. Київ, ОЕП «ГРІФРЕ».
5. (1996) ГKD 34.26.701-96 *Екранні труби парових котлів. Методика розрахунку ресурсу служби*. Львів, ОРГРЕС, сс. 1–12.

References

1. Zlepko, V.F., Voronov, N.P. (1975) Investigation of pipe metal properties of heating surfaces under operation conditions. *Service reliability of metal of power equipment*. In: Transact. of VTI. Moscow, Energiya, 16-24 [in Russian].
2. Meiklyar, M.V. (1961) *How steam boiler metal works*. Moscow, State energy publishing house [in Russian].
3. (1979) *Manual on operation of 300MW blocks with direct flow boiler TPP-210 «A» and K-300-240 turbine*. Ukrainka [in Russian].
4. (2005) *SOU-N MPE 40.1.17.401:2004: Control of metal and prolongation of the life of basic elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants*. Kyiv, GRIFRE OEP [in Ukrainian].
5. (1996) *GCD 34.26.701-96: Screen tubes of steam boilers. Method of service resource calculation*. Lviv, ORGRESS, 1-12 [in Ukrainian].

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТРУБ НИЖНЬОЇ РАДІАЦІЙНОЇ ЧАСТИНИ КОТЛІВ ТПП-210А, ПІСЛЯ ПЕРЕХОДУ НА СПАЛЮВАННЯ ГАЗОВОГО ВУГІЛЛЯ

А.В. Грузевич^{1,2}, Д.А. Дереча^{2,3}

¹Трипільська ТЕС. 08720, Київська область, Обухівський р-н, м. Українка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²Інститут магнетизму НАН України та МОН України. 03142, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського 36-б

³НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57

На сьогодні в тепловій енергетиці склалася надзвичайно важка ситуація, пов'язана з припиненням поставок антрацитового штибу на теплові електростанції. У зв'язку з цим одним з основних завдань в сучасній теплоенергетиці є технічне переозброєння ряду ТЕС що проходить зі зміною проектного виду палива антрацитового штибу та їх перехід на спалювання газового вугілля марки Г. Тому дослідження експлуатаційної надійності труб нижньої радіаційної частини котлів після переходу на спалювання газової групи вугілля є досить актуальним питанням. Бібліогр. 5, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: енергетичне обладнання, поверхні нагріву, екранні труби, корозія, окалина, надійність, котли, тепло-електростанція

INVESTIGATION OF OPERATIONAL RELIABILITY OF PIPES OF LOWER RADIATION PART OF TPP-210A BOILERS AFTER TRANSITION TO GAS COAL COMBUSTION

A.V. Gruzevich^{1,2}, D.A. Derecha^{2,3}

¹Tripolje TPP. 08720, Ukrainka, Obukhiv distr., Kyiv reg., Ukraine. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²Institute of Magnetism of the NAS of Ukraine and MES of Ukraine. 36-b acad. Vernadskii Blvd., 03142, Kyiv

³NTUU «Igor Sikorsky KPI». 57 Pobedy Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine.

The current situation in thermal energy sector is extremely grave, because of interruption of supplies of anthracite culm to thermal power stations. In this connection, one of the main problems in modern power engineering is technical re-equipment of a number of TPS, involving the change of design kind of anthracite culm fuel and their transition to combustion of gas coals of G grade. Therefore, studies of operational reliability of pipes in the lower radiation part of boilers after transition to combustion of the gas group of coals is a highly urgent issue. 5 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

Keywords: power equipment, heating surfaces, screen tubes, corrosion, scale, reliability, boilers, thermoelectric power station

Поступила в редакцію
14.08.2019

ПСЕ-2020

XVI Міжнародна науково-технічна конференція ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ-2020 8 – 12 червня 2020 р., м. Київ, Україна



**Інститут електродинаміки Національної академії наук України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Представництво Польської академії наук у м. Києві**

спільно з:

- Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут»
- Національним університетом «Львівська політехніка»
- Науковою радою з наукових основ електроенергетики
- Громадською організацією «Пані Наука»

АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ РІЗНОРІДНИХ СТАЛЕЙ В КОНСТРУКЦІІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРУБОПРОВОДУ РИФОРМІНГУ РЕАКТОРНОГО БЛОКУ

С.З. Стасюк

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

Розглянуто особливості руйнування технологічного трубопроводу риформінгу реакторного блоку з робочим продуктом із вмістом водню до 85 %, напрацювання якого становило 200 000 год при 520 °С і тиску середовища 5,3 МПа. В конструкції трубопроводу труби зі сталі 15Х5М мартенситного класу були з'єднані аустенітними швами між собою і з фланцем зі сталі 20 перлітного класу. Показано, що мікроструктура основного металу труби, металу зварного шва і навколошовної зони не зазнала суттєвих змін від дії водневовмісного середовища за довготривалої експлуатації. Проте в матеріалі фланця відбулася воднева корозія, яка проявилася у знеуглецюванні та деградації властивостей металу, що привело до руйнування зварного з'єднання. Знеуглецювані зони, які утворилися навкруги ланцюжків чистого графіту (продукту розпаду цементиту) і коагульованих частинок цементиту, послабили матрицю та забезпечили крихке руйнування. Встановлено, що тріщина розповсюдилась по металу фланця по ділянкам нормалізації та неповної перекристалізації зони термічного впливу. Бібліогр. 23, табл. 5, рис. 6.

Ключові слова: водневовмісне середовище, технологічні трубопроводи, тривале напрацювання, металографічні дослідження, мікроструктура металу, механічні випробування, характеристики міцності, пластичності та ударної в'язкості, температура крихкості, деградація властивостей, руйнування

Вступ і постановка задачі. Технологічні трубопроводи хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної промисловості являють собою об'єкти, що складаються з окремих елементів (труб, з'єднаних зварюванням, фасонних деталей, фланців, арматури тощо), тому одним із шляхів економії матеріалів при виготовленні є можливість використання в окремих вузлах деталей із низьколегованих або вуглецевих сталей, тоді як сам трубопровід виготовлено з високолегованої сталі. Зварювання високолегованих сталей з середньо- чи низьколегованими або вуглецевими складає окрему проблему, відому як зварювання різнорідних сталей [1–3]. Оскільки особливістю різнорідних зварних з'єднань є значна хімічна та структурна неоднорідність металу шва, утворюються кристалізаційні та дифузійні прошарки по лінії сплавлення значно відмінні від структури металів, що сплаваються (основного металу і металу шва). Зміни структури можуть бути настільки сильними, що суттєво знизяться їх характеристики міцності та пластичності, внаслідок чого можливе передчасне (аварійне) руйнування конструкції. Гідрогенізаційні процеси при каталітичному риформінгу відносяться до основних технологічних процесів у нафтопереробних і нафтохімічних виробництвах, при яких внаслідок циклів реакції здійснюється приєднання водню до різних металів і сплавів в умовах високих температур 420...550 °С і тиску від 0,1 до 70 МПа. При довготривалому контакті металу з водневовмісним середовищем за температур 260...550 °С і тиску 2,1...6,6 МПа метал насичується воднем і, в

наслідок цього, виникає воднева корозія – знеуглецювання сталі та воднева крихкість – втрата металом пластичності, що викликана виникненням і розвитком тріщин внаслідок акумулювання водню на різних дефектах (дислокаціях, вакансіях, міжзеренних границях тощо). Вивченню впливу дії середовища із вмістом водню на пошкодження структури та зміну фізико-механічних властивостей матеріалу присвячено багато досліджень і вони знайшли сучасне відображення в рамках праці колективу авторів [4]. Традиційно технологічні трубопроводи установок каталітичного риформінгу нафтопереробного виробництва виготовляють зі сталей, легуваних карбідоутворюючими елементами (Cr і Mo). Схильність таких сталей до водневої корозії оцінюють за кривими Нельсона [4, 5], керуючись якими визначають область безпечної експлуатації сталі на реальних об'єктах при заданих параметрах технологічного процесу: температурі та тиску. Дослідження [6] показали, що при тривалому напрацюванні сталі (навіть після $2 \cdot 10^5$ год) в робочих умовах при дії високих температур від 250 до 600 °С та високих тисків, хоча ознаки вихідної структури зберігаються, проте властиві їй механічні характеристики можуть суттєво змінюватись. В напрацьованому металі можна спостерігати зміну мікроструктури переважно поблизу меж зерен, коли вільний вуглець дифундує з тіла зерна до його меж, утворюючи там карбіди нанотовщини [7], які сприяють окрихченню металу. Водень не тільки пришвидшує ці дифузійні процеси в структурі, а також посилює ріст мікротріщин та інших мікрodefек-

тів [4, 8–10]. В роботі [11] показано, що довготривале напрацювання хромомолібденової сталі (2Cr–1Mo) в конструкції трубопроводів риформінгу реакторного блоку установок каталітичного риформінгу не призвело до змін структури і механічних властивостей металу за термін служби $2,5 \cdot 10^5$ год, проте процеси водневої корозії ініціюються у зварних швах, і це проявляється у різкому зниженні ударної в'язкості металу шва, внаслідок чого відбувається зміщення критичної температури крихкості в область позитивних температур.

Дослідження структури металу зварного з'єднання у взаємозв'язку з механічними характеристиками є актуальною задачею, яка і обумовила мету даної роботи: вивчення впливу експлуатаційного напрацювання в умовах дії водню високих параметрів (за температури і тиску) на поведінку зварного з'єднання різнорідних сталей – мартенситного (труби із сталі марки 15X5M) і перлітного (фланець зі сталі 20) класів в конструкції технологічного трубопроводу реакторного блоку установки риформінгу після напрацювання 200 000 год за температури 520 °C і тиску 5,3 МПа.

Зазначимо, що для роботи у водневому середовищі (у трубопроводі подання робочого продукту з реактора риформінгу до теплообмінника вміст водню складав 85 %) зазначений матеріал даного трубопроводу (хромомолібденова сталь) відповідає вимогам його використання при заданих температурі та тиску, проте матеріал фланцю (вуглецева сталь) не може бути пристосований до експлуатації в заданих умовах, а саме її використання рекомендовано в інтервалі від 260 °C до 280 °C [4, 10]. Через те, що ці сталі відрізняються своїми фізико-хімічними властивостями, важко було отримати якісне і надійне їх зварне з'єднання, через що відбулося руйнування ділянки трубопроводу по периметру зварного шва з'єднання труби з фланцем.

Для визначення причин руйнування і наслідків тривалої дії водню високих параметрів (за температури і тиску) проведено лабораторні дослідження металу трубопроводу, які включали мікроструктурні дослідження і механічні випробування.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували зразки, взяті з двох ділянок трубопроводу зі зварними швами пошкодженої (ділянка 1) і непошкодженої (ділянка 2, контрольна) частин

труби. Хімічний склад металів наведено у табл. 1. Металографічні дослідження виконано на поперечних темплетях, контрольована поверхня яких включала переріз шва з прилеглою до нього зоною термічного впливу і ділянок основного металу обох сталей даного з'єднання. Мікроструктуру виявляли згідно з рекомендаціями [12, 13], її параметри визначали за допомогою мікроскопів «НЕ-ОФОТ-32» і МИМ 10, використовуючи стандартні методи згідно з [14–16]. Зазначимо, що зварне з'єднання на контрольній ділянці трубопроводу, як і на ділянці руйнування, виконано аустенітними матеріалами. Випробування проводили на розтяг згідно з ДСТУ EN 1002-1 [17] і ДСТУ EN 1002-5 [18] та ударну в'язкість при температурах 20 і 525 °C – робочої температури експлуатації трубопроводу. Характеристики ударної в'язкості основного металу і зварних з'єднань отримано на зразках Шарпі за ДСТУ EN 10045-1 [19] і ГОСТ 6996 [20], відповідно використовуючи маятниковий копер PSWO-30 з максимальною енергією маятника 294 Дж і швидкістю руху маятника в момент удару 5,6 м/с. Зразки виготовлено таким чином, щоб розповсюдження тріщини руйнування проходило по товщині перерізу труби.

Результати досліджень мікроструктури. Мікроструктурний аналіз основного металу труби зі сталі 15X5M і металу шва ділянок 1 і 2 показав наступне. На зруйнованій ділянці 1 трубопроводу в основному металі виявлено велику кількість неметалевих включень (переважно нітридів титану) різного ступеню дисперсності (від 0,005 до 0,050 мм) і форм (шестигранники, трикутники, прямокутники), які здебільшого наявні у поперечному та повздовжньому перерізах труби і, практично, не спостерігаються на внутрішній і зовнішній поверхнях. Відмітимо, що мікроструктура сталі характерна для структури самогартування сорбіту по усіх перерізах труби. Є деякі відмінності у розмірах зерен (табл. 2). На контрольній ділянці 2 трубопроводу в основному металі труби присутні неметалеві включення в незначній кількості (оксиди точкові та стрічкові, включення нітридів, силікати пластичні) і крихкі, одиничні частинки алюмосилікатів, а також наявні дефекти типу пор. Найбільша кількість неметалевих включень спостерігається на внутрішній поверхні труби. Мікроструктура основного металу ідентична в

Таблиця 1. Хімічний склад металу конструктивних елементів трубопроводу

Назва	Вміст елементів, мас. %								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	S	P	Cu
Метал труби ділянки 1 (сталь 15X5M)	0,145	0,34	0,30	5,3	0,55	0,16	0,01	0,014	0,10
Метал фланцю (сталь 20)	0,189	0,41	0,217	0,11	–	0,08	0,019	0,005	–
Зварний шов ділянки 2 (Електрод марки ОЗЛ-8)	0,085	1,98	0,23	20,7	0,12	10,7	0,005	0,032	0,07

Таблиця 2. Показники структури основного металу труби зі сталі 15X5M пошкодженій ділянці труби

Місце дослідження	Розмір зерна	
	Бал	Середній розмір d_m , мм
Поперечний переріз труби	8	0,022
Поздовжній переріз труби	8	0,022
Зовнішня поверхня труби	8–9	0,015...0,022
Внутрішня поверхня труби	7–8	0,022...0,031

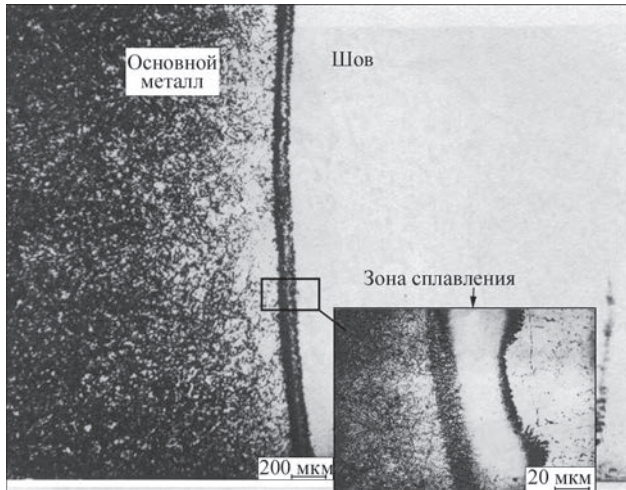


Рис. 1. Мікроструктура зварного з'єднання труби зі сталі 15X5M контрольної ділянки 2

усіх розглянутих перерізах і являє собою ферит та карбіди типу $Me_7C_3 + Me_{23}C_6 + Me_3C$.

У зварному шві контрольної ділянки 2 неметалевих включень небагато (це оксиди точкові, сульфід) і вони рівномірно розподілені по всьому перерізу шва. Мікроструктура зварного

з'єднання ділянки 2 представлена на рис. 1, ділянки 1 – на рис. 2, показники структури металу шва за проходами (шарами) і навколошовної зони – у табл. 3 і 4. Усі шари чотирипрохідного зварного шва з'єднання труби з фланцем мають однакові параметри макроструктури шва: ячеїсто-дендритна структура з гранульованим зерном у границі сплавлення величиною 4–5 бали і 2–3 бали в центральній частині шва (рис. 2). При віддаленні від границі сплавлення до центру шва зеренна структура порушується (рис. 2, а), з'являються тонкі стовбчасті дендрити шириною до 0,01 мм і довжиною від 1,0 до 1,5 мм. У центрі шва кристаліти зменшуються, формується крупне грануляційне зерно 2 (3) бала (рис. 2, б). У зварному шві наявні неметалеві включення: точкові оксиди (1 бал) з розміром частинок від 0,003 до 0,005 мм, які розміщено в основному у корені шва; частинки глинозему трикутної, прямокутної форм та у формі трапеції і мають поперечні розміри від 0,01 до 0,03 мм. Глиноземні частинки розміщені в основному по границях шарів багатопрохідного зварювання і виникли внаслідок неякісного зачищення їх поверхонь. Показники структури металу шва надано в табл. 4. Отже в металі шва аномальних структур не виявлено і можна стверджувати, що за час високотемпературної тривалої експлуатації у водневому середовищі структурні зміни і структурно-фазові перетворення не відбувалися.

Будова зони сплавлення основного металу з металом шва являє собою дифузійний прошарок –

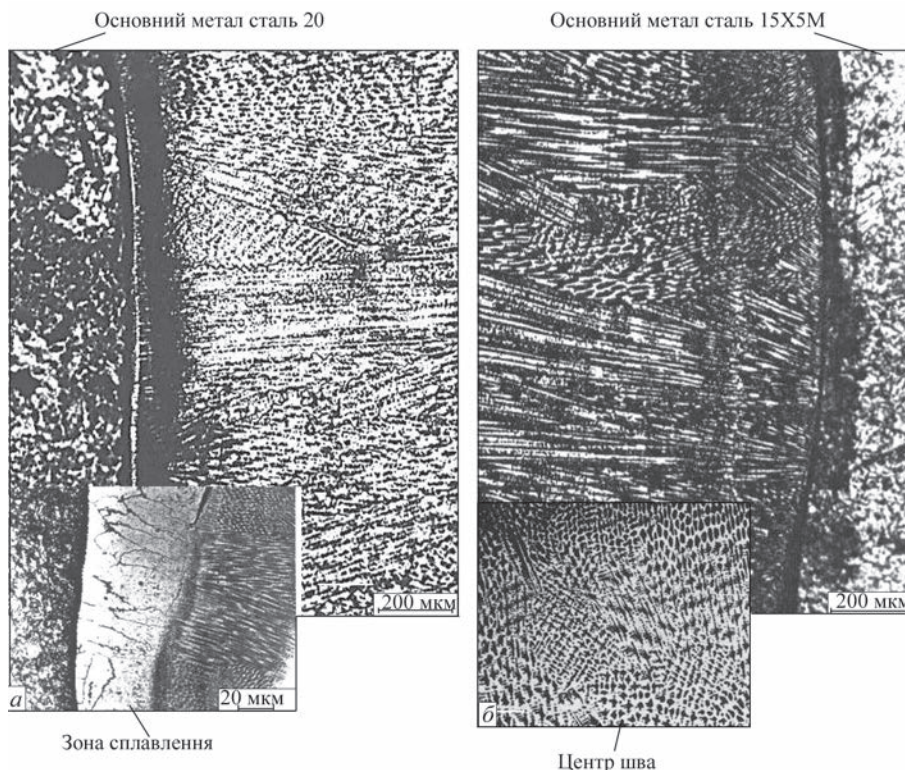


Рис. 2. Мікроструктура металу шва приварювання фланця зі сталі 20 до труби зі сталі 15X5M: а – з боку фланця; б – з боку труби

Таблиця 3. Показники структури металу шва і навколошовної зони зварного з'єднання контрольної ділянки труби

Назва, місце дослідження за проходами (шарами), структурні області	Протяжність, мм	Зерно		Стовчасті кристали		
		Розмір, мм	Середній розмір d_m , мм	Ширина, мм	Довжина, мм	
Зварний шов	Шар I	6,4	4	0,088	–	–
	Шар II	4,5	–	–	~0,06...0,10	~0,7...0,12
	Шар III	4,7	–	–	~0,04...0,07	~0,5...0,7
	Шар IV	2,3	–	–	~0,02...0,03	до 0,4
Зона сплавлення	Шар I	–	5...6	0,062...0,044	–	–
	Шар II	–	6	0,044	–	–
	Шар III	–	6	0,044	–	–
	Шар IV	–	6...7	0,044...0,031	–	–
*Зона термічного впливу	Ділянка 1	~0,2	6...7	0,044...0,031	–	–
	Ділянка 2	~0,3...0,4	8	0,022	–	–
	Ділянка 3	~0,6...0,8	9...10	0,015...0,011	–	–
	Ділянка 4	~1,0...1,2	10(9)	0,011...0,015	–	–
Основний метал		–	7...8	0,031...0,022	–	–

Примітки. *Ділянка 1 – неповного розплавлення; ділянка 2 – перегрівання; ділянка 3 – нормалізації; ділянка 4 – неповної перекристалізації.

Таблиця 4. Показники структури металу шва (периферія) пошкодженої ділянки труби

Проходи (шари)	Протяжність, мм	Зерно шару I	
		Розмір зерна, мм	Середній розмір d_m , мм
I	~0,3	4	0,088
II	~0,3	5	0,062
III	~0,3	6...7	0,044...0,031
IV	~0,3	6	0,044

вузьку перехідну область між металом шва і ділянкою неповного розплавлення основного металу, шириною від 0,03 до 0,05 мм. Цей дифузійний прошарок може розвиватися в процесі високо-температурної експлуатації, як це досліджено в роботах [1, 2, 21]. В зоні сплавлення виникає структурна неоднорідність, коли відбувається дифузія вуглецю із зони менш легованого матеріалу в більш легований, і тоді спостерігається знеуглецьований прошарок з боку менш легованого металу і науглецьований – з боку більш легованого металу. В структурі навколошовної зони ділянки 2 різких границь між переходами від однієї ділянки до іншої (неповного розплавлення, перегрівання, нормалізації та рекристалізації) не існує: відбувається повільний перехід однієї структури в іншу.

Мікроструктура металу фланця представлена на рис. 3. Ферито-перлітна структура металу

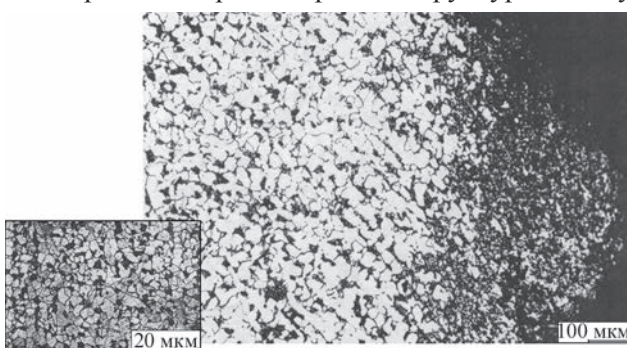


Рис. 3. Мікроструктура металу фланця зі сталі 20

містить 80 % фериту і не більше 20 % зернистого перліту. Присутність в мікроструктурі укрупнених зерен фериту (7 і навіть 6 балів), а також наявність їх чітких границь є свідченням того, що в основному металі відбулася рекристалізація. В металі, що безпосередньо примикає до місця руйнування, присутні дефекти овальної форми – це пори або поглиблення від частинок, що випали, розміром від 0,01 до 0,1 мм. Зазначимо, що такі дефекти стали осередками виникнення та розвитку тріщин. Область руйнування показана на рис. 4. По обидва боки від магістральної тріщини розкрилися вторинні тріщини, які проходили в метал під кутом (30...40°) до магістральної. Ширина пороженчів вторинних тріщин складала від 0,02 до 0,1 мм, а їх протяжність (довжина) 1,0 мм і більше. Крім того, в металі фланцю з'явилися зигзагоподібні переривисті ланцюжки із вільного графіту (продукту розпаду цементиту), які також могли ініціювати тріщини (рис. 4, в). Розсипи цих ланцюжків спостерігались на рівні першого та другого шару від кореню шва. Глибина їх проникнення в метал відмічалася до 15 мм, а ширина знаходи-

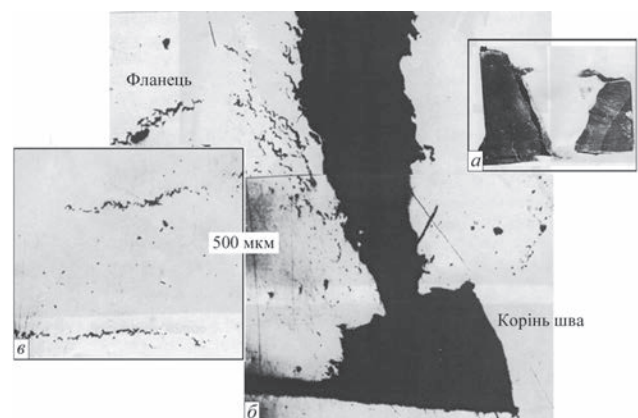


Рис. 4. Область руйнування зварного шва приварювання фланця до труби: а – макроструктура; б – магістральна тріщина; в – зигзагоподібні ланцюжки в металі фланця зі сталі 20

лась в межах від 0,0002 до 0,005 мм. Вони розповсюджувались від зерна до зерна поздовж границь сусідніх зерен (рис. 5, а). Навкруги ланцюжків сформувалися знеуглецьовані області розмірами 0,7...0,8 × 1,0...1,5 мм, звільнені від перлітної складової мікроструктури (майже чистий ферит з розмірами зерна до 7 балів), саме утворення яких спричинено розпадом цементиту і концентрованою виділення графіту в окремих ланцюжках по границях зерен. Окрім графітизації металу фланця мала місце коагуляція частинок цементиту (рис. 5, в): у структурі наявні відносно крупні частинки розмірами 20...30 мкм і частинки розмірами від 0,4 мкм до 3...5 мкм, навкруги яких також утворилися знеуглецьовані зони звільнені від перліту (рис. 5, б).

Отже, виникнення тріщини спричинено графітними ланцюжками, які проникли в основний метал фланця вглиб і розповсюдились по його висоті (до рівня I і II шарів зварного шва). Руйнування з'єднання пройшло по ділянках нормалізації і неповної перекристалізації в матеріалі фланця, на яких питома довжина границь зерен дуже висока (максимальна в порівнянні з іншими ділянками ЗТВ) через малий розмір зерен і, отже, там, велика концентрація виділених частинок вільного графіту, які послабили матрицю та обумовили крихке руйнування металу.

Таким чином, мікроструктурні дослідження показали, що воднева корозія металу фланця, проявом якої стало знеуглецьовання, виникла че-

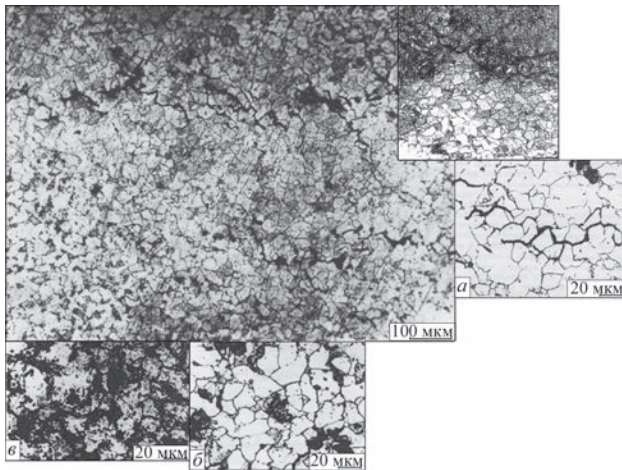


Рис. 5. Мікроструктура зони термічного впливу зварного шва з боку фланця: а – зигзагоподібні графітні ланцюжки; б – знеуглецьовані зони; в – коагуляція частинок цементиту

рез те, що не були враховані рекомендації [5, 10] щодо можливості використання фланця зі сталі 20 у середовищі з вмістом водню за температури більше 280 °С.

Результати досліджень механічних характеристик. Як показали результати випробувань (табл. 5) характеристики міцності та пластичності основного металу труб ділянок 1 і 2 відповідають вимогам нормативно-технічної документації. Міцність зварного шва за кімнатної температури практично співпадає з такою основного металу, а за робочої температури спостерігається підвищення його міцності в середньому на 12 %. Таким чином, можна стверджувати, що фактори – тривале напруження при температурі 525 °С і водневе середовище не вплинули на зміни механічних властивостей матеріалу труби зі сталі 15Х5М за характеристиками міцності і пластичності. Відмітимо, що більший вплив тривалої дії водню виявлено на зміни ударної в'язкості металу шва: так, величина *KCV* майже у три рази менша такої основного металу, проте вона наближена до нормованої для сталей аустенітного класу (не нижче ніж 50 Дж/см² [22, 23]). Між тим, такий вплив може бути достатньо суттєвий для зміщення температури крихкості в область позитивних температур.

Для дослідження цього фактору визначали критичну температуру крихкості T_k в температурному інтервалі, до якого входили точки $T_k \pm 10$ °С, $T_k \pm 20$ °С, $T_k \pm 30$ °С, $T_k \pm 40$ °С, використовуючи графіки залежності ударної в'язкості *KCV* і в'язкої складової в зламі *B* від температури, за критеріальними значеннями цих показників для хромомолібденових сталей, по яких *KCV* дорівнює 35 Дж/см², а *B* – 50 % (рис. 6). Отримані дані показали, що для основного металу труби пошкодженої ділянки 1 (див. рис. 6, а, б) перехід від крихкого руйнування до в'язкого спостерігається у вузькому діапазоні температур: від –29 до –20 °С при зміні величини *KCV* від 38 до 177 Дж/см². Важливо відмітити, що таке різке підвищення ударної в'язкості пов'язано зі збільшенням тільки опору металу зародженню руйнування. Так, співставлення експериментальних даних з оцінкою поверхні руйнування зразків показало, що при значеннях *KCV* > 147 Дж/см² метал в області верхів'я концентратора зазнав значну пластичну деформацію на стадії зародження руйнування, яка супро-

Таблиця 5. Механічні характеристики основного металу і металу шва з'єднання труби зі сталі 15Х5М

Назва		Температура випробувань, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	<i>KCV</i> , Дж/см ²
Основний метал	Ділянка 1	20	505,8	227,6	36,0	76,6	204,1
		525	298,0	169,4	24,7	83,6	334,8
	Ділянка 2	20	500,3	237,2	36,0	77,3	225,8
		525	298,0	160,5	33,4	84,3	305,8
Метал шва ділянки 2 (руйнування по шву)		20	515,6	–	–	–	60,0
		525	326,0	–	–	–	96,0

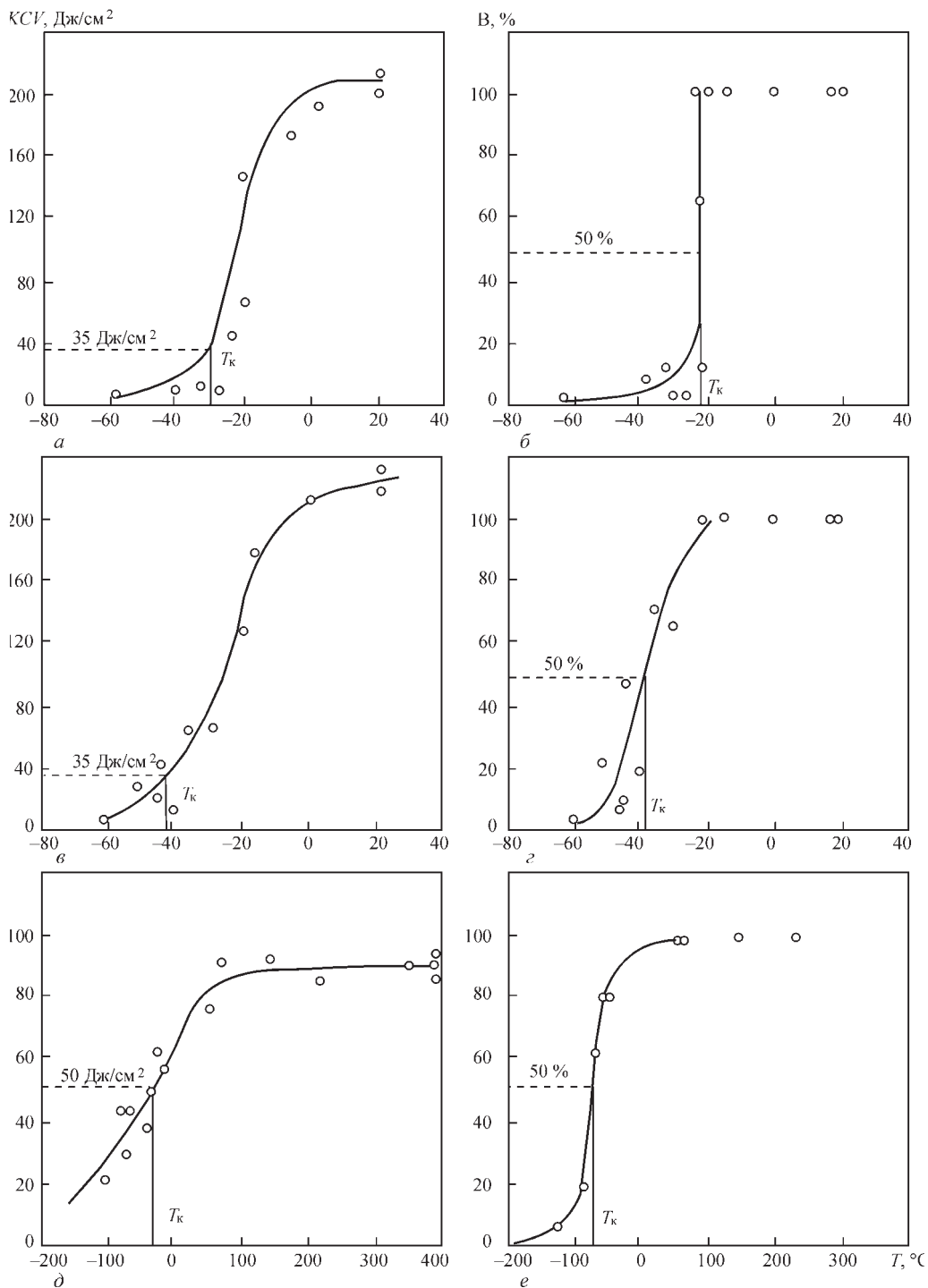


Рис. 6. Визначення температури крихкості металу труби зі сталі 15X5M ділянок 1 і 2 за показниками ударної в'язкості (KCV) і в'язкої складової у зламі (B): а, б – основний метал ділянки 1; в, з – основний метал ділянки 2; д, е – зварний шов ділянки 2

воджувалася утяжкою по товщі зразка до 26 % і значним витягуванням металу в напрямку розтягування. Величина розширення зразка з боку удару маятника складала 22 %. Між тим поверхня зламу у центральній частині зразка (зона розвитку руйнування) слабо волокниста з вкрапленням блискучих фасеток (крихка складова) впритул до температури 20 °С. У основного металу труби ділянки 2 (рис. 6, в, з) відмічається відносно плавний перехід від в'язкого руйнування до крихкого. При цьому критичні температури крихкості визначено в більш низькому діапазоні відносно ділянки

1: за показниками KCV і B вони становили -40 і -38 °С, відповідно. Метал шва, виконаний аустенітними матеріалами, відрізнявся від основного металу відсутністю явного переходу від в'язкого до крихкого руйнування (рис. 6, д, е). Як видно з наданих на рисунку графіків, із зниженням температури ударна в'язкість повільно зменшувалася з максимального рівня 60 Дж/см^2 при кімнатній температурі до 6 Дж/см^2 за температури -190 °С, а T_k , визначена за критеріальним значенням ударної в'язкості для аустенітних сталей ($KCV = 50 \text{ Дж/см}^2$), ста-

новила 0 °С. Відмітимо, що для досліджуваних аустенітних швів достатньо складно було ідентифікувати ділянки крихких і в'язких руйнувань на поверхні зламу зразків. Так, в температурному діапазоні від 20 до -90 °С спостерігалась рихла волокниста поверхня зламу з характерними ділянками відриву у вигляді штрихів, які можна вважати умовно крихкими, розмір і кількість яких збільшувались із зниженням температури. Проте при 20 °С (і вище) злам в'язкий зі значними утяжками кромки; руйнування відбувалось шляхом зрізу; в центральній частині зразка поверхня зламу була орієнтована уздовж ліній ковзання з переважаючим руйнуванням за механізмом зсуву. Отримані дані показали, що основний метал і метал шва трубопроводу знаходяться у в'язкому стані як при експлуатаційній, так і кімнатній температурах, між тим критична температура крихкості шва зміщена в область понижених температур.

Враховуючи те, що високотемпературна експлуатація в умовах дії водню високих параметрів не викликала деградацію механічних характеристик матеріалу труби зі сталі 15Х5М і її зварних з'єднань, проте, у зв'язку з підвищенням температури в'язко-крихкого переходу зварних швів за певних умов експлуатації може статися крихке руйнування ділянки трубопроводу. З метою запобігання виробничих інцидентів, під час технічних наглядів чи експертних обстежень трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу гідравлічні або пневматичні випробування на міцність повинні проводитись за температури не менше 15 °С. В штатних умовах експлуатації (відповідно до регламентних режимів) внаслідок високого рівня в'язких властивостей матеріалу і механічних характеристик небезпека руйнування за робочими температурами (від 525 до 550 °С) відсутня.

Висновки

1. Мікроструктура основного металу труби трубопроводу, металу шва і навколошовної зони не зазнала значних змін від дії водневовмісного середовища за довготривалої експлуатації. Механічні властивості основного металу труби зі сталі 15Х5М, експлуатація якої відбувалася за температури 520 °С і тиску середовища 5,3 МПа протягом 200 000 год знаходяться в межах вимог стандарту на цю сталь, механічні характеристики зварних швів суттєво не відрізняються від основного металу і мають показники не нижче вказаних у нормативних документах [11, 23].

2. Мікроструктурні дослідження показали, що руйнування зварного з'єднання пішло по ділянках нормалізації та неповної перекристалізації зони термічного впливу в матеріалі фланцю зі сталі 20, де питома довжина границь зерен значно вища

в порівнянні з іншими ділянками через малий їх розмір, тому велика концентрація частинок вільного графіту, що виділився там, послабила матрицю та забезпечила крихке руйнування металу. До того ж мала місце коагуляція частинок цементиту з утворенням навколо них знеуглецьованих областей.

3. Внаслідок довготривалої експлуатації за температури 520 °С і тиску середовища 5,3 МПа протягом 200 000 год відбулася воднева корозія металу фланця зі сталі 20, яка проявилася у знеуглецьованні та деградації властивостей металу, що є наслідком порушення рекомендацій [5, 10] щодо можливості використання даної марки сталі тільки в інтервалі температур 260...280 °С з урахуванням напрацювання 10⁵ год і більше.

Список літератури

1. Бельчук Г.А., Земзин В.Н. (1978) Сварка разнородных сталей, металлов и сплавов. *Сварка в машиностроении: справочник*. Акулов А.И. (ред.). Москва, Машиностроение, Т.2, сс. 322–364.
2. Готальский Ю.Н. (1981) *Сварка разнородных сталей*. Киев, Техника.
3. (2007) СТО-00220368-011-2007 *Сварка разнородных соединенных сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах*, Волгоград.
4. Назарчук З.Т. (ред.) (2017) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн.*, у 8-ми томах. Львів, Простір-М.
5. Нельсон Г.Г. (1988) *Водородное охрупчивание. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов*. Брайнт К.Л., С.К. Бенерджи (ред.). Москва, Металлургия, сс. 256–333.
6. Крижанівський Є.І., Осташ О.П., Никифорчин Г.М. та ін. (2016) *Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів*. Львів, Простір-М, Т.1.
7. Nechaev Yu.S. (2008) Metallic materials for the hydrogen energy industry and main gas pipelines: complex physical problems of aging, embrittlement, and failure. *Phys. Usp.*, **51**, 681–697.
8. Пахмурский В.И., Федоров В.В. (1981) Некоторые особенности влияния водорода на магнитные и структурные превращения в переходных металлах и сплавах на их основе. *Физ.-хим. механика материалов*, **1**, 3–11.
9. Колачев Б.А. (1985) *Водородная хрупкость металлов*. Москва, Металлургия.
10. Арчаков Ю.И. (1985) *Водородная коррозия сталей*. Москва, Металлургия.
11. Стасюк С.З. (2018) Контроль технічного стану технологічних трубопроводів за довготривалої експлуатації у водневовмісному робочому середовищі. *Технічна діагностика і нерозрушаючий контроль*, **1**, 8–20.
12. Панченко Е.В., Скаков Ю.А., Кример Б.И. и др. (1965) *Лаборатория металлографии*. Москва, Металлургиздат.
13. Коваленко В.С. (1970) *Металлографические реактивы: справочник*. Москва, Металлургия.
14. ГОСТ 5639-82 *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна*.
15. ГОСТ 1778-70. *Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений*.
16. ГОСТ 8233-56 *Сталь. Эталоны микроструктуры*.

17. ДСТУ EN 1002-1:2006 *Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Ч.1. Метод випробування за кімнатної температури.*
18. ДСТУ EN 1002-5:2018 *Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Ч.5. Метод випробування за підвищених температур.*
19. ДСТУ EN 10045-1:2018 *Матеріали металеві. Випробування на ударний згин за Шарпі. Частина 1 Метод випробування.*
20. ГОСТ 6996-66 (ISO 4136-89, ISO 5173-81, ISO 5177-81). *Сварные соединения. Методы определения механических свойств.*
21. Закс И.А. (1973) *Сварка разнородных сталей.* Москва, Машиностроение.
22. (2010) НПАОП 0.00-6.09-10 *Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження обладнання установок гідрогенізаційних процесів у нафтопереробному, нафтохімічному та хімічному виробництві.*
23. (2018) НПАОП 0.00-1.81-18 *Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском.*

References

1. Belchuk, G.A., Zemzin, V.N. (1978) Welding of dissimilar steels, metals and alloys. Welding in machine-building. Ed. by A.I. Akulov. Moscow, Mashinostroenie, Vol. 2, pp. 322-364 [in Russian].
2. Gotalsky, Yu.N. (1981) *Welding of dissimilar steels.* Kiev, Tekhnika [in Russian].
3. (2007) STO-00220368-011-2007: *Welding dissimilar joints of vessels, apparatuses and pipelines from carbon-, low-alloy, high-temperature, high-alloy steels and alloys on iron-nickel and nickel bases.* Volgograd [in Russian].
4. (2017) *Technical diagnostics of materials and structures:* Refer. book. In: 8 Vol. Ed. by Z.T.Nazarchuk. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
5. Nelson, G.G. (1988) *Hydrogen embrittlement. Embrittlement of structural steels and alloys.* Ed. by K.L.Brajent, S.K. Benerdzhii. Moscow, Metallurgiya, 256-333 [in Russian].
6. Kryzhanivskiy, E.I., Ostash, O.P., Nykyforchyn, G.M. et al. (2016) *Service degradation of structural materials.* Vol. 1. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
7. Nechaev, Yu.S. (2008) Metallic materials for the hydrogen energy industry and main gas pipelines: Complex physical problems of aging, embrittlement, and failure. *Phys. Usp.*, **51**, 681–697 [in Russian].
8. Pakhmurskiy, V.I., Fedorov, V.V. (1981) Some peculiarities of hydrogen effect on magnetic and structural transformations in transition metals and alloys on their base. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialov*, **1**, 3–11 [in Russian].
9. Kolachev, B.A. (1985) *Hydrogen brittleness of metals.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
10. Archakov, Yu.I. (1985) *Hydrogen corrosion of steels.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Stasyuk, S.Z. (2018) Monitoring the technical condition of process pipelines in long-term service in hydrogen-containing working medium. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 8–20 [in Russian].
12. Panchenko, E.V., Skakov, Yu.A., Krimer, B.I. et al. (1965) *Laboratory of metallography.* Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
13. Kovalenko, V.S. (1970) *Metallographic reagents:* Refer. book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
14. GOST 5639-82: *Steels and alloys. Methods for identifying and determining grain size* [in Russian].
15. GOST 1778-70: *Steel. Metallographic methods for detection of nonmetallic inclusions* [in Russian].
16. GOST 8233-56: *Steel. Microstructure standards.*
17. DSTU EN 1002-1: 2006: *Materials are metal. Tensile test. Pt 1: Test method at room temperature* [in Ukrainian].
18. DSTU EN 1002-5: 2018: *Materials are metal. Tensile test. Pt 5: Test method at elevated temperatures* [in Ukrainian].
19. DSTU EN 10045-1:2018: *Charpy impact test on metallic materials. Pt. 1. Test method* [in Ukrainian].
20. GOST 6996-66 (ISO 4136-89, ISO 5173-81, ISO 5177-81): *Welded joints. Methods of mechanical properties determination* [in Russian].
21. Zaks, I.A. (1973) *Welding of dissimilar steels.* Moscow, Mashinostroenie [in Ukrainian].
22. (2010) NPAOP 0.00-6.09-10: *Procedure for conducting inspection, testing and expert examination of equipment of plants of hydrogenation processes in oil refining, petrochemical and chemical production* [in Ukrainian].
23. (2018) NPAOP 0.00-1.81-18: *Occupational safety rules during operation of pressure equipment* [in Ukrainian].

ANALYSIS OF BEHAVIOUR OF DISSIMILAR STEEL WELDED JOINT IN THE STRUCTURE OF REFORMING PROCESS PIPELINE OF A REACTOR BLOCK

S.Z. Stasyuk

G.P. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevskaya Str., 01014, Kyiv.
E-mail: ips@ipp.kiev.ua

The paper deals with the features of fracture of reforming process pipeline of a reactor block transporting working product with up to 85% hydrogen content, with operating time of 200 000 h at 520 C and medium pressure of 5.3 MPa. In the pipeline structure pipes from steel 15Kh5M of martensitic class were joined by austenitic welds to each other and to a flange from steel 20 of pearlitic class. It is shown that microstructure of the pipe base metal, weld and HAZ metal did not undergo any essential changes from the impact of hydrogen-containing medium during long-term service. However, hydrogen corrosion occurred in the flange material, which was manifested in decarbonization and degradation of metal properties that led to welded joint fracture. Decarbonized zones which formed around the pure graphite chains (cementite decomposition products) and coagulated cementite particles weakened the matrix and caused brittle fracture. It is found that the crack propagated through the flange metal in the areas of normalizing and incomplete recrystallization of the HAS. 23 Ref., 5 Tabl., 6 Fig.

Keywords: hydrogen-containing medium, process pipelines, long-term service; metallographic studies, metal microstructure, mechanical testing, characteristics of strength, ductility and impact toughness, brittleness temperature, property degradation, fracture

Надійшла до редакції
20.09.2019

АНАЛІЗ РИЗИКІВ НА ТЕХНІЧНУ БЕЗПЕКУ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ТА ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ НК і ТД ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА

А.Г. Потап'євський, Ю.К. Бондаренко, Ю.В. Логінова, К.О. Артюх

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

Контроль якості – це функція менеджменту, процес забезпечення досягнення цілей організації за допомогою оцінки та аналізу результатів діяльності, оперативного втручання у виробничий процес і прийняття коригуючих дій. Основним завданням контролю є процес забезпечення досягнення цілей і місії організації. Діяльність керівників підприємств і вищих ланок управління, що встановлюють стандарти, норми і нормативи, які перевіряють і оцінюють відповідність їм продукції, є коригування роботи персоналу. Необхідність контролю обумовлена наступними обставинами: потреба організації процесу виробництва зварних конструкцій відповідно до наявних резервів і ресурсів безпеки експлуатації; вимоги споживачів до якості, стандартів і сертифікації продукції, що випускається; змінюються внутрішні і зовнішні умови виробництва; необхідність виявлення тенденцій з мінливого попиту і пропозиції продукції; формування бази даних для подальшого планування витрачання матеріальних та фінансових коштів; вдосконалення нормативних показників по праці та НК і ТД; своєчасне втручання у виробничий процес при відхиленнях від прийнятих норм і нормативів та ін., аналіз результатів НК і ТД. Бібліогр. 11, рис. 3.

Ключові слова: умови виробництва, контроль, обладнання, прилади, інструменти, технологічна документація, менеджери, система контролю, людський фактор, морально-психологічний клімат, ризик, ризик-менеджмент

Ризик є завжди, але очевидно, що прийняття рішень щодо його мінімізації та усунення потребує структурованого і системного підходу. Наприклад, керівникам вищої, середньої та лінійної ланок належить постійно аналізувати ризики, пов'язані з небезпеками, які виникають у дуже складних ситуаціях на зварювальному виробництві.

Продукція для зварювального виробництва розділена на чотири групи:

Professional Welding Tools (PWT) – професійне зварювальне устаткування, призначене для підприємств малого й середнього бізнесу, де потрібні довговічність, надійність і повна готовність його до роботи з моменту покупки, до того ж, завдяки своєму рівню воно вимагає мінімальних навичок роботи від користувача.

Industrial Welding Systems (IWS) – високопотужні й продуктивні зварювальні системи, які частіше застосовуються на великих промислових підприємствах, а також для рішення складних технологічних завдань, що вимагають спеціального виконання.

Resistance Spot Welding (RSW) – точкове зварювання опором, широко застосовується при виготовленні конструкцій в електронній промисловості, у судо-, літако-, автомобілебудуванні, сільському господарстві, інших галузях промисловості й побуту. Зварювання застосовується при рихтуванні й зварюванні кузовів машин, при виготовленні шаф і корпусів, які використовують в електротехнічній промисловості, виробництві виробів каркасної форми [1].

Welding Automation – автоматизовані системи й компоненти, які гарантують найвищу якість з'єднань, а також максимальну швидкість зварювання й продуктивність наплавлення при зварюванні позовжніх, кільцевих і криволінійних швів.

Professional Welding Tools. Устаткування класу PWT було спочатку задумане для максимального широкого застосування, тому ставка при його розробці була зроблена на універсальність. Його високу ефективність й якість зварних з'єднань забезпечує цифровий пристрій керування технологічним процесом, що контролює всі етапи зварювання. Порівняно недавно в дивину був навіть лічильник, що фіксує, скільки годин працював апарат, а сьогодні є можливість одержувати дані про час роботи апарата, кількість вкладеного тепла у виріб. До того ж, тепер системи для зварювання MIG/MAG стали універсальними й працюють як із дротом суцільного перетину, так і з ручним дуговим зварюванням покритим електродом (MMA) і зварюванням вольфрамовим електродом, що не плавиться (TIG DC).

Новинки для зварювання TIG тепер мають модульну конструкцію, що дозволяє користувачеві вибирати тільки ті можливості, які необхідні для виконання його завдань. Всі апарати оснащені touchscreen-дисплеєм.

Industrial Welding Systems. Устаткування IWS знайшло найширше застосування в різних галузях промисловості – виробництво сільськогосподарської техніки та комплектую-

Бондаренко Ю.К. ORCID ID 0000-0002-8758-9924

Логінова Ю.В. ORCID ID 0000-0002-1023-3663

© А.Г. Потап'євський, Ю.К. Бондаренко, Ю.В. Логінова, К.О. Артюх, 2019

чих до неї, виготовлення великих металоко-
струкцій на підприємствах суднобудування,
енергетичне машинобудування та авіакосмічна
промисловість.

Особливістю даного типу устаткування є мож-
ливість інсталяції зварювальних процесів безпо-
середньо в апарат, що робить його унікальним для
кожного конкретного користувача. А наявність
власної IP-адреси в просунутих моделях кожної
лінійки дозволяє: вести облік зварювальних режи-
мів, їхнє документування; вводити та редагувати
різні параметри зварювальних процесів, зберігати
їх на різних пристроях; виконувати розрахунок
тепловкладання виходячи зі зварювальних пара-
метрів; обмежувати доступ користувачів для вне-
сення змін у зварювальні режими; переглядати
встановлене ПО; зв'язувати устаткування в мере-
жу й за допомогою програм стежити за роботою
кожної системи.

**WeldCube – те, про що мріяли, і навіть тро-
хи більше.** Програмне забезпечення, розробле-
не фахівцями, гарантує виконання поставлених
завдань. Для інноваційної зварювальної техніки
воно стає навіть більш важливим, ніж силова ча-
стина апарата. Виробник установлює в ньому пев-
ний набір електронних програм, які можуть до-
повнюватися по модульному принципу. Маючи
базову систему – силовий блок, механізм подачі
дроту – власник устаткування може докуповувати
не модулі, а програми й одержувати в результаті
дані, які раніше розраховувалися лише приблизно.

Раніше такої можливості не було. Він міг, на-
приклад, придбати систему MIG/MAG у стандарт-
ному варіанті або з функцією Pulse Multi Control.
Вона забезпечує зварникові доступ до широкого
спектра синергетичних характеристик, які повні-
стю використовують можливості апаратів остан-
нього покоління [2].

Якщо коштів на Pulse Multi Control не виста-
чало, клієнт отримував систему без цієї функції,
але згодом змушений був викладати навіть біль-
шу суму на агрегат із цією опцією, коли виникла
необхідність у ньому. Зараз підприємець вирішує,
що йому потрібно в конкретний момент. Якщо,
скажемо, через рік він зрозуміє, що йому потрібна
система РМС, то доплатить за неї, і одержить її в
електронному вигляді.

При повному цифровому керуванні система
сама контролює робочі параметри та передає опе-
раторові. Так, ПО WeldCube призначено для керу-
вання даними під час зварювання. За допомогою
Wi-Fi WeldCube поєднує апарати в мережу й пере-
дає через неї дані про ризик збільшення витрати
дроту, швидкості зварювання, час роботи системи,
кількість наплавленого матеріалу, режими, які ви-
користав зварник. Технологи підприємства одержу-
ють унікальну можливість знімати інформацію

з джерела та аналізувати її з використанням НК і
ТД зварних з'єднань.

Власник підприємства або керівник виробни-
цтва може задати період часу, за який хоче одер-
жати інформацію. До впровадження повного
цифрового керування подібний аналіз міг здійс-
нюватися тільки при наявності спеціальної про-
грами, з'єднання через роз'єм та кабель. Зараз
усе уніфіковано. Досить USB-роз'єму та Інтерне-
ту або Wi-Fi-модуля, щоб з'єднатися прямо через
Інтернет, зайти в меню апарата й одержати аналіз
даних із всіх пристроїв.

Це рішення актуально для всієї номенклатури
зварювальної техніки. Цифрові пристрої керуван-
ня процесом зварювання дозволяють удосконали-
ти планування сучасного виробництва, одержати
серйозну економію часу та матеріалів.

Додаток WeldConnect допомагає кожному звар-
никові швидко знаходити оптимальні параметри
для виконання завдань. Програма запитує точ-
ні дані про процес зварювання, вихідний матері-
ал, профілі зварного шва, захисний газ, які мож-
на ввести вручну або за допомогою сканування
QR-коду на етикетках відповідних матеріалів. Ця
інформація дозволяє обчислити ідеальні пара-
метри зварювання для додатків TIG та MIG/MAG.
Користувач точно знає, які сили струму й напруги
застосовувати для досягнення ідеального зварно-
го шва. Цінно й те, що при необхідності отрима-
ні параметри можна зберегти й відправити через
WiFi у базу даних для контролю або дефектоско-
пісту, що виконує аналогічне завдання.

Високу оцінку спеціалістів, наприклад, одер-
жує візок на магнітній підставі із гнучкою рей-
кою, що дозволяє автоматизувати зварювання
великих об'єктів. При її використанні не має зна-
чення, над якою саме деталлю працює зварник –
листом або стіною вагона. Є тільки припустимі
кути вигину рейки й ступінь кріплення візка маг-
нітом або струбциною. За допомогою пульта звар-
ник управляє плавним рухом агрегату, його коли-
ванням і може використати потрібний апарат, аж
до ручного пальника.

Сьогоднішній день вивів на ринок безліч агре-
гатів, призначених для виконання різних завдань
виробництва: зварювання поздовжніх швів, для
більших обсягів робіт й інші.

Одне з таких рішень – FTW 24-120 PRO – для
орбітального зварювання труб або тіл обертання
виконується за допомогою головок як відкритого
типу, з подачею присадного дроту, так і закрито-
го. Другий варіант застосовується для зварювання
тонкостінних труб, товщиною до 3 мм, тобто там,
де подача дроту не потрібна. «Мозок» установки
для орбітального зварювання – контролер. Він ді-
лить трубу на сектори, задаючи в кожному з них
свої зварювальні параметри.

Можливо розробити устаткування для зварювання й по ТЗ замовника. У цьому випадку розробник відповідає за його працездатність і гарантує повну відповідність технічним завданням, поставленим замовником.

Багато виробників зварювального устаткування купують готові технології, а потім використовують їх у своїй продукції. СМТ-технологія розроблялася протягом п'яти років. Паралельно йшла робота над створенням устаткування під неї.

СМТ – Cold Metal Transfer – холодний перенос металу. В основі цієї технології лежить принцип дугового зварювання короткозамкненою дугою, а точніше – принцип планового систематичного переривання такої дуги. У результаті послідовних «гарячих–холодних–гарячих–холодних» імпульсів значно знижується тиск дуги, що забезпечує високу стійкість процесу й надає широке технологічне «вікно». Це зручно, наприклад, у випадку різкої зміни положення зварювального пальника [3].

Від відомої технології дугового зварювання короткозамкненою дугою СМТ відрізняють: система контролю переміщення дроту, інтегрована у цифровий пристрій керування технологічним процесом; знижений коефіцієнт тепловкладання; мінімізоване розбризкування в процесі переносу металу. Це раніше здавалося недосяжним, але стало можливим завдяки двом взаємозалежним явищам: зворотно-поступальному руху дроту та контрольованому короткому замиканню.

Ці системи широко використовуються в усьому світі, у тому числі в Україні.

Особливо це актуально для наплавлення та відновлення дорогих деталей із хромонікелевих сплавів.

До цього складу в наплавленому шарі зварювання вироблялося два або три рази, що робило процес досить витратним. Якщо на один шар було потрібно 7 кг дуже коштовного нержавіючого хромонікелевого дроту, то на три проходи, відповідно – 21 кг. При СМТ задані параметри твердості та наявності хімічних елементів формуються вже в першому наплавленому шарі. Це відбувається за рахунок мінімального перемішування наплавленого дроту з основним матеріалом. При цьому значно скорочується кількість тепла, що виділяється та знижується на 30 % тепловкладання в матеріали, що підлягають зварюванню.

Технологія СМТ має найширше застосування, що дозволяє розвивати значно більші швидкості зварювання тонколистових металів, зварювати дуже тонкий алюміній. Великий інтерес представляє зварювання СМТ із можливістю нескінченного обертання.

Для реалізації інноваційної технології фахівцями розроблено кілька нових системних компонентів, побудованих на основі існуючої серії циф-

рових пристроїв. Система подачі дроту тепер має два окремих пристрої із цифровим керуванням: переднє, що перебуває на пальнику, забезпечує зворотно-поступальний рух дроту із частотою до 70 разів у секунду, і основне – підштовхує дріт позадку. Для того, щоб відокремити пристрої один від одного, між ними розташований буфер для дроту, що компенсує інверсні рухи. Це дозволяє переміщати дріт практично без зусиль.

Особливу міцність з'єднання елементів при точковому зварюванні опором забезпечує апарат для зварювання кузовів автомобіля.

На EuroBLECH-2018 була представлена унікальна модель DeltaCon, що дозволяє зварювати дуже широкі крапки для підвищення надійності з'єднання деталей. Вона кріпиться на руку робота й функціонує тільки з ним. Зборка елементів кузова автомобіля відбувається «крапка за крапкою», і все – з однаковою якістю. Після виконання зварювання кожної крапки процес-стрічка переміщається в наступне положення, що є абсолютною інновацією. Наступна зварена крапка формується новим електродом, без утворення бризок на поверхні. Завдяки цьому контактна поверхня залишається чистою.

Ця технологія дозволяє з'єднати між собою деталі з будь-яких матеріалів: алюмінію з алюмінієм; сталі з алюмінієм; сталі з покриттям, високоміцної й надміцної сталі; CrNi сплавів, титана, магнію, змішаних з'єднань. Вона надійно з'єднує між собою деталі різної товщини, а також багат шарові з'єднання.

Жоден виробник зварювальної техніки не може гарантувати якісного зварювання, якщо використовується неякісний дріт або параметри газу не відповідають нормам.

Робить все, щоб характеристики устаткування відповідали самим жорстким вимогам НД та ринку. Навіть при нинішній непростій ситуації в європейській економіці не йдуть на здешевлення продукції за рахунок переносу виробництва в країни з дешевою робочою силою, не замінюють дорогі матеріали низькосортними. У всіх апаратах використовують тільки європейські компоненти й ті, що виготовлено на виробничих площадках в Австрії, Уельсі, Чехії та США.

Українські підприємці, на жаль, рідко зважаються на вагомий інвестиції з далеким прицілом. Причини зрозумілі: у нас що не рік, то який-небудь стрес. Але ті, хто прагне зміцнитися на ринку й стати конкурентноздатним, уже переконалися, що витрати на устаткування такого класу себе виправдовують.

Однак останнім часом з'явилася ще одна проблема: усе менше працівників хочуть бути зварниками, принаймні, в Україні. В результаті багато підприємств відчувають недостачу кваліфікова-

ного персоналу. Цього року ряду навчальних закладів урядом виділено засоби на формування центрів навчання зварників. До честі України потрібно сказати, що більшість цих центрів укомплектовується новою технікою. Молоді люди будуть учитися не на позавчорашніх картинках і плакатах, а на передовому сучасному устаткуванні [3, 4].

Ризик продукції протягом життєвого циклу пов'язан з [3]:

- призначенням конструкції;
 - виробничими чинниками, а саме невідповідностями процесів: 1 – проектування; 2 – виробництва; 3 – монтажу; 4 – експлуатаційного обслуговування; 5 – недостовірностями та невизначеностями процесів випробувань протягом життєвого циклу 1–4;
 - фізичними впливами на зварну конструкцію.
- Аналіз призначення конструкції містить:
- умови експлуатації (дії на конструкцію);
 - законодавчі вимоги щодо конструкції та аналізування ризиків;
 - рівень якості аналогічної продукції на ринку;
 - аналіз ризиків впливів на людину при виробництві та експлуатації конструкції;
 - аналіз ризику впливу на навколишнє середовище при виробництві та експлуатації;
 - аналіз ризиків використання не за призначенням;
 - аналіз залишкових ризиків після дій персоналу при усуненні екстрених ситуацій (рис. 1, 2).

Одним з основних завдань системи менеджменту якості виробництва є забезпечення виявлення потенційних невідповідностей і попередження їх виявлення в зварній конструкції. Відхилення процесів системи менеджменту є причинами утворення браку зварних конструкцій, що випускається і збільшення затрат на НК і ТД.

Запропоновано взаємозв'язок утворення ризику невідповідної продукції як результат функціонування системи менеджменту якості проекту-



Рис. 1. Якісна оцінка ризиків

вання, виробництва, технічного обслуговування, контролю та основних факторів впливів [5].

Стандарти менеджменту якості розглядають ризики як ймовірні відхилення кожного з процесів виробництва, який описує повну діяльність зварювального підприємства по управлінню, виробництву, вимірюванню, НК і ТД, постачанню, моніторингу. Тому рекомендується визначити ризики, притаманні кожному з процесів. Запропоновано процесний підхід. Це дозволить визначити як власника процесу, так і власника ризику, відповідальних за процес з яким пов'язано виникнення проблеми, а також процеси, які випереджують загальний процес і визначають причинно-наслідкові зв'язки при виникненні ризику (рис. 1).

При експлуатації зварних конструкцій суттєвими впливами можуть вважатись механічні дії на конструкцію та корозійні впливи, що приводять до корозійного пошкодження металу.

Ризик експлуатації конструкції розглядається як ймовірність відмови і пов'язані з цим витрати на НК і ТД та ремонт.

Відмовою може вважатись зміна властивостей конструкції понад граничний стан. Аналіз літературних джерел показав, що граничний стан від механічних дій на зварну конструкцію поділяють на дві групи, яка в свою чергу має підгрупи [3].

Перша група містить граничні стани, перехід через які призводить до повної непридатності об'єкта (основи конструкції, конструкції або елемента) до експлуатації і для яких позаграничними станами може бути:

- руйнування будь-якого характеру (в'язке, крихке, в результаті втоми);
- втрата стійкості форми;

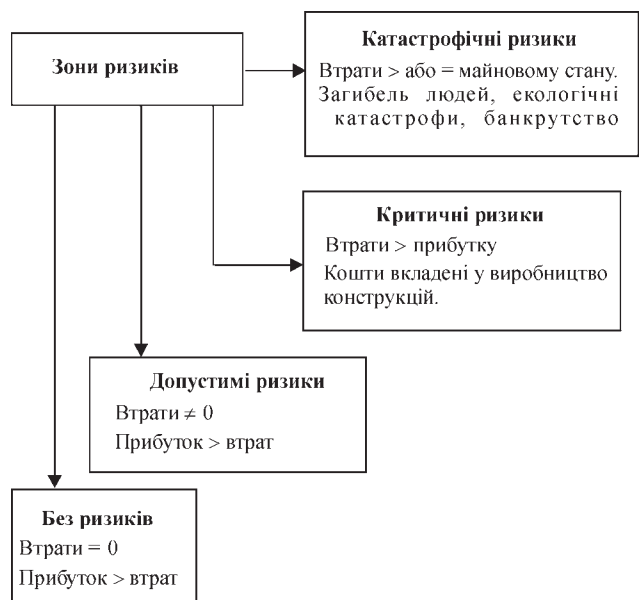


Рис. 2. Якісна оцінка ризиків з урахуванням концепції прийнятного ризику і можливих результатів діяльності персоналу

- втрата стійкості положення;
- перехід у змінну систему;
- якісна зміна конфігурації;
- інші явища, за яких виникає потреба в припиненні експлуатації (наприклад, виникнення перфорації стінки ємності з токсичними речовинами або надмірні переміщення основи при посадках сипучих ґрунтів).

Граничні стани цієї групи можуть бути пов'язані з порушенням вимог збереження чи можливості існування об'єкта або недотримання вимог безпеки для людей та довкілля. Досягнення граничного стану першої групи класифікується як відмова-зрив (відмова, яка одразу ж викликає аварії та збитки) (рис. 2).

Друга група містить граничні стани, які ускладнюють нормальну експлуатацію об'єкта або зменшують його довговічність порівняно з встановленим терміном експлуатації і для яких поза граничним станом є:

- надмірне перевищення або повороти деяких точок конструкції, недопустимі коливання (надмірні значення амплітуди, частоти, швидкості, прискорення);

- утворення та розкриття внутрішніх дефектів, досягнення ними гранично допустимих значень розкриття чи довжини (в відповідальних конструкціях тріщини не допускаються) згідно з НК і ТД;

- втрата стійкості форми у вигляді локального деформування;

- пошкодження від корозії чи інших видів фізичного зношення, які призводять до необхідності обмеження експлуатації внаслідок зменшення терміну експлуатації об'єкта згідно з інформацією отриманою від НК і ТД [6].

Граничні стани цієї групи можуть бути пов'язані з порушенням вимог щодо використання об'єкта без обмежень, можливостей обслуговування персоналом, зовнішнього вигляду, можливостей модернізації. Часто ці граничні стани класифікуються як «відмова–перешкода» (рис. 2).

Актуальність проблеми прийняття ефективних управлінських рішень щодо функціонування підприємств, компетентність персоналу в умовах підвищеного ризику, що є невід'ємною характеристикою ринкових відносин, стрімко росте. Це повною мірою стосується виробників зварених конструкцій, тому що підприємства-постачальники стратегічної сировини для військового виробництва, за політичних факторів (зовнішні політичні ризики) втратили традиційних споживачів продукції.

Тому перед українськими виробниками зварних конструкцій стало завдання якнайшвидше впровадити європейські стандарти по керуванню та організації зварювальним виробництвом з метою приведення їх у відповідність до міжнарод-

них і європейських вимог, що базуються на ризик-орієнтованому підході.

Успіх у справі оцінки та мінімізації ризиків гарантовано тим підприємствам, де поряд з гарним законодавством має місце якісне інформаційне забезпечення, впровадження механізмів і поширення знань з оцінки ризиків та компетентність персоналу.

Важливою складовою інтеграції з ЄС є питання охорони праці та збереження здоров'я працівників. Це один з тих ключових моментів економічної інтеграції з ЄС, важливий для всіх зацікавлених сторін, задіяних у процесі створення матеріальних цінностей і насамперед для працівників, що випробовують вплив небезпек, пов'язаних з виробничими процесами, наприклад, такими як зварювальне виробництво [6].

Розвиваючись у рамках ринкової економіки, уряди країн ЄС повинні бути впевнені, що економіка буде розвиватися без нанесення шкоди здоров'ю людей, а також без травматизму й нещасних випадків. Це положення повною мірою стосується і зварювального виробництва. Повинна бути прозора гарантія: якщо щось і трапиться, то потерпілі повинні бути надійно захищені в рамках системи соціального державного захисту в Україні.

Оцінка ризиків дуже важлива й для бізнесу – якщо роботодавці піклуються про безпечні умови праці, вони гарантовано одержать постійний розвиток – як зварювального виробництва так і бізнесу. Як показали час і досвід – ключовий момент цієї інтеграції полягає в тому, що всі нормативні документи (НД), що стосуються безпечних умов праці на зварювальному виробництві, єдині для всіх країн.

Виробничі ризики, з якими зіштовхуються роботодавці, згодом змінюються. Наприклад, раніше одним з найбільших ризиків – небезпечних галузей у ЄС була вугледобувна. На сьогодні її майже повністю реформували, фактично скоротили, тому неактуальними стали й ризики вугледобутку.

Як свідчить статистика, має місце ріст нещасних випадків у сфері технічних послуг. Як показали дослідження останнім часом найбільш високі ризики несуть так звані складні клієнти. Це стало предметом серйозного обговорення й наробітків нових підходів у ЄС до рішення даної проблеми.

Нові ризики виникають у тому числі при зміні технологій НК і ТД, що у свою чергу приводить до змін у зварювальному виробництві. Скажімо, впровадження нанотехнологій, різних нових матеріалів — це додаткові ризики й погрози для умов роботи.

В економічному полі держави контроль та якість безпеки продукції й послуг забезпечується взаємодією двох гармонійно взаємодіючих систем – системи стандартизації та системи оцінки відповідності. При цьому перша встановлює норму,

а друга покликана забезпечити вірогідність даних про її досягнення.

Оцінка відповідності встановленим вимогам припускає проведення процедури контролю, що здійснюється органами, що інспектують, часто мають назву – контролюючі. Ці органи використовуються в державі як уповноважені для виконання регламентованих схем підтвердження відповідності при обов’язковій оцінці безпеки продукції або послуг методом прямої оцінки НК і ТД, на відміну від сертифікації по ІСО/МЭК 65, що є непрямю (комбінованою).

Для уніфікації термінології вмовимося, що під словом «продукція» варто розуміти проектування зварної конструкції, послугу, технологічний процес і виробництво. Під «контролем» – дослідження проекту продукції, НК і ТД зварної конструкції, послуги, технологічного процесу або устаткування; визначення їхньої відповідності конкретним вимогам НД або, на підставі професійної оцінки, загальним вимогам. Контроль технологічних процесів включає наявність таких складових: персонал, технічні засоби, технологію та методологію.

Здійснення контролю як процедури оцінки відповідності засновано на методі інспекції. Орган, що інспектує, – це орган, що виконує контроль (інспекцію). Цілком зрозуміло, що інспектування залежить від професійного судження конкретного персоналу – інспектора. Тому компетенція органів, що інспектують, багато в чому залежить від їхніх знань, досвіду та навичок інтерпретації. Особливо це актуально для деяких типів контролю, наприклад, пов’язаних з безпекою, де повинні бути встановлені й строго дотримуватися вимог до кваліфікації та професійного досвіду інспекторів, наприклад, підтвержені сертифікацією персоналу з НК і ТД [6].

Практичне використання методу інспектування підлягає прийняттю в міжнародній практиці правила – «один стандарт – одна оцінка». У процесі оцінки методом інспектування використовуються дві основні логіко-методологічні процедури: верифікації та валідації.

При інспектуванні зварних конструкцій або технологічного процесу інспектору необхідно використовувати технічні засоби контролю (НК і ТД). Якщо в процесі інспекції потрібно досліджувати зварні конструкції більш ретельно, то вона проводиться з використанням методу «випробування». При цьому кваліфікація інспектора повинна дозволити оцінити ступінь вірогідності отриманих результатів випробування. Інспектор повинен бути досить компетентним, щоб оцінити правильність проведення випробувань та вірогідність одержання результатів, він повинен знати й уміти застосовувати методики випробувань НК і

ТД, об’єктивно проводити оцінку на відповідність встановленим вимогам НД.

Міжнародний стандарт ISO/IEC 17020 формулює основні вимоги до функціонування різних типів органів, що проводять інспектування. У діючій версії ISO 17020 вимоги до організацій, що інспектують, розкриті в 14 розділах, які включають: адміністративні вимоги; вимоги незалежності, неупередженості, чесності; контролюючий орган повинен бути незалежним відповідно до типу акредитації А, В, З; конфіденційність; організація та керування; система якості; персонал; технічні засоби та устаткування; методи контролю та процедури; порівняння зі зразками та виробами для контролю; контроль звітів; протоколи контролю і сертифікати контролю; укладання договору із субпідрядником; скарги і звернення; співробітництво з іншими органами, що інспектують.

Аналіз професора А. Маслоу показав, що поведінка персоналу, що інспектується визначається широким спектром потреб (див. рис. 3). Ці потреби він розбив на п’ять категорій і розташував їх у визначеній ієрархії. В основі цієї ієрархії лежать найбільш насущні потреби (їжа, вода, житло), а на вершині – більш високі індивідуальні запити (визнання, самовираження). Коли потреби найнижчого рівня задоволені хоча б частково, персонал починає рухатися до задоволення потреб іншого і не обов’язково наступного рівня ієрархії та підвищує якість технічних послуг (рис. 3).

Усе, що необхідно для підтримки життя персонала підприємства, об’єднується в категорію фізіологічних потреб. Перш ніж персонал зможе переслідувати якісь інші цілі, йому необхідно задовольнити ці основні потреби. В умовах «золотого мільярда» більшість людей, що працюють і одержують зарплату, цілком спроможні задовольнити свої фізіологічні потреби, тому запити вищих рівнів стають усе сильнішим мотиваційним чинником. Наприклад, коли персонал має достатню кількість предметів першої потреби, з її боку буде логічно застрахуватися від можливих втрат. Така потреба в безпеці і подібні їй можуть бути задоволені завдяки



Рис. 3. Піраміда Маслоу [7]

достатньо високій заробітній платі, що дозволяла би робити заощадження, а також завдяки системам медичного і соціального страхування і програмам пенсійного забезпечення та гарантій зайнятості, безпеки – управління ризиками на підприємстві [8].

Вище від потреби в безпеці розташоване бажання персоналу спілкуватися між собою, відчувати приналежність до виробничого колективу підприємства. Як показали дослідження, ці виробничі та соціальні потреби можуть бути для працівників підприємства важливіші за фінансові потреби. Персонал також має потребу у визнанні – їм потрібне відчуття цінності своєї особистості як невід’ємної частини єдиного цілого. Персонал потребує поваги, заснованої на досягненнях у змаганні з іншими людьми. Всі ці потреби тісно пов’язані з поняттям статусу, що означає «вагу» або «важливість» людини в очах оточення. Можливість задоволення таких потреб може бути потужним мотиватором при виготовленні якісних та безпечних конструкцій на підприємстві [9–11].

Професор Маслоу визначив потребу в самовираженні як «бажання стати більшим, ніж ти є, стати всім, на що ти спроможний». Ця потреба найвищого порядку, і задовольнити її складніше за все. Персонал, що досягає цього рівня, працює не просто заради грошей або заради справляння враження на інших, але тому, що усвідомлюють значимість своєї роботи і відчувають задоволення від самого її процесу та підтримуванні системи менеджменту ризику на підприємстві [9].

Маслоу, створюючи свою теорію мотивацій, намагався пояснити, чому в різний час у персонала виникають різні потреби. Він вважав, що потреби людини мають ієрархічну структуру з 5 рівнів (рис. 3).

У кожній конкретній момент часу персонал буде прагнути до задоволення тієї потреби, що для неї є важливішою або сильною.

Фізіологічні потреби (потреби найнижчого рівня) є необхідними для виживання.

Потреби в безпеці включають потреби в захисті від фізичних і психологічних небезпек (ризиків) з боку навколишнього світу і впевненість у тому, що фізіологічні потреби будуть задовольнятися в майбутньому (покупка страхового полісу або пошук надійної роботи з гарними видами на пенсію та здоров’я).

Соціальні потреби (потреби в приналежності, дружби, любові) включають почуття приналежності до чого-небудь або кого-небудь, підтримки колективу підприємства.

Потреби в повазі включають потреби в особистих досягненнях, компетентності, повазі з боку оточуючих, визнанні (система менеджменту ризику).

Потреби в самовираженні, самореалізації – потреби в реалізації своїх потенційних можливостей і зростанні як особистості, компетентності.

Спочатку персонал прагне задовольнити потреби нижчого рівня, потім може думати про задоволення наступної за значимістю потреби. Основний недолік теорії Маслоу зводиться до того, що їй не вдалося врахувати індивідуальні відмінності людей. Виходячи з минулого досвіду, одна людина може бути найбільше зацікавлена у самовираженні, у той час як поведінка іншої буде в першу чергу визначатися потребою у визнанні, соціальними потребами та безпекою на виробництві [10].

Професор Маслоу вважає, що психічні (фізіологічні) потреби середнього персоналу задовольняються на 85 %, екзистенційні – на 70 %, соціальні – на 50 %, престижні – на 40 %, самовираження – на 10 %. Статистика говорить, що тільки один-два відсотки людей прагне до вершини піраміди [11].

Висновки

1. Продукція для зварювального виробництва розділена на чотири групи.

2. Визначено показники граничних станів зварної конструкції від механічних дій та показники якості корозійних впливів на безпеку експлуатації.

3. Встановлено, що одним з основних завдань системи менеджменту якості зварювального виробництва згідно з ДСТУ ISO 9001:2015 є забезпечення виявлення потенційних невідповідностей в системі зварювального виробництва і попередження їх виявлення за допомогою менеджменту ризику з використанням НК і ТД. Відхилення процесів системи управління персоналом є причинами утворення браку продукції, що випускається та виникнення ризику аварійної ситуації на виробництві.

4. Керування ризиками є обов’язковою частиною управлінського процесу, тому що це має фундаментальне значення для зварювального підприємства на всіх рівнях і в усіх сферах: якості виконання робіт із зварювання та НК і ТД, безпеки праці, екології, енергозбереженні відповідно до національних та міжнародних стандартів.

Список літератури

1. Бондаренко Ю.К., Логінова Ю.В., Артюх К.О. (2019) Аналіз вимог міжнародних нормативних документів з метою створення стратегії безперервності вітчизняного зварювального виробництва для забезпечення його дієздатності і конкурентоспроможності. *XII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп’ютерного конструювання матеріалів» 18–19 квітня 2019 р., Київ, «КІП імені Георгія Сікорського»*, сс. 89–92.
2. Бондаренко Ю.К., Логінова Ю.В., Артюх К.О. (2019) Аналіз вимог міжнародних нормативних документів з метою створення стратегії безперервності вітчизняного зварювального виробництва для забезпечення його

- дієздатності і конкурентоспроможності. *Международная научно-техническая конференция «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении» 16–18 мая 2019 г., Одесса*. Одесса, ОНПУ, сс. 10–13.
3. Ковальчук О.В., Логінова Ю.В., Бондаренко Ю.К., Потап'євський А.Г. (2019) Результати дослідження та аналізу факторів небезпек з метою створення методик оперативного планування в системі виробництва та монтажу зварних конструкцій. *Міжнародна конференція «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2019» 23–24 травня 2019 р. Київ, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»*.
 4. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 *Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику* (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT).
 5. Бондаренко Ю.К., Артюх К.О., Логінова Ю.В. (2019) Исследование влияния источников рисков на техническую безопасность сварных конструкций при эксплуатации. *Конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий», м. Свалява, 20–24 травня 2019 р.*, сс. 20–23
 6. Bondarenko Yu., Loginova Yu, Artyuh K. et al. (2017) *Development of Methods of Risk Detection Assessment in the Welding*. Düsseldorf, Germany, Academic publishing LUMBERT.
 7. Маслоу А. (2004) *Мотивация и личность*. Киев, PSYLIB.
 8. Дмитриченко Л.І., Чунихина Т.С., Дмитриченко Л.А., Химченко А.Н. (2010) *Корпорация в системе общественного производства*. Монография. Донецк, ТОВ «Східний видавничий дім».
 9. *A Theory of Human Motivation — original 1943 article by Maslow*. <http://psychclassics.yorku.ca/Maslow/motivation.htm>
 10. *Maslow's Hierarchy of Needs – Teacher's Toolbox. A video overview of Maslow's work by Geoff Petty*. <http://www.teacherstoolbox.co.uk/maslow.html>
 11. *A Theory of Human Motivation: Annotated*. <https://web.archive.org/web/20061110104536/http://emotionalliteracyeducation.com/abraham-maslow-theory-human-motivation.shtml>
- the Basis of the Newest Physical and Material Research and Computer-aided Design of Materials (April 18-19, 2019, Kyiv)*. Kyiv, Igor Sikorsky KPI, pp. 89-92.
2. Bondarenko, Yu.K., Loginova, Yu.V., Artyukh, K.O (2019) Analysis of requirements of international normative documents in order to create a strategy of continuity of domestic welding production to ensure its efficiency and competitiveness. *In: Proc. of Intern. Sci. and Techn. Conf. on New and Unconventional Technologies in Resource and Energy Saving (May 16-18, 2019, Odessa)*. Odessa, ONPU, pp. 10–13.
 3. Kovalchuk, O.V, Loginova, Y.V, Bondarenko Y.K, Potapievskiy, A.G (2019) Results of research and analysis of hazard factors in order to create methods of operational planning in the production and installation of welded structures. *In: Proc. of Intern. Conf. on Innovative Technologies and Engineering in Welding and Related Processes - PolyWeld 2019 (May 23-24, 2019 Kyiv)*. Kyiv, NTUU «KPI I. Sikorsky».
 4. DSTU IEC/ISO 31010: 2013: *Risk management. General risk assessment methods* (IEC/ISO 31010: 2009, IDT) [in Ukrainian].
 5. Bondarenko, Yu.K., Artyukh, K.O, Loginova, Yu.V. (2019) Investigation of the impact of risk sources on the technical safety of welded structures during operation. *In: Proc. of Conf. on Surface Engineering and Product Renovation (May 20–24, 2019, Svalyava)*, pp. 20–23 [in Russian].
 6. Bondarenko, Yu., Loginova, Yu., Artyuh, K. et al. (2017) *Development of methods of risk detection assessment in the welding*. Düsseldorf, Germany, Academic publishing LUMBERT.
 7. Maslow, A. (2004) *Motivation and personality*. Kiev, PSYLIB [in Russian].
 8. Dmitrichenko, L.I., Chunikhina, T.S., Dmitrichenko, L.A., Khimchenko, A.N. (2010) *Corporation in the system of social production: Monography*. Donetsk, Shidnyi Vydavnychiy Dim [in Russian].
 9. *A theory of human motivation — original 1943 article by Maslow*. <http://psychclassics.yorku.ca/Maslow/motivation.htm>
 10. *Maslow's Hierarchy of Needs – Teacher's Toolbox. A video overview of Maslow's work by Geoff Petty*. <http://www.teacherstoolbox.co.uk/maslow.html>
 11. *A theory of human motivation: Annotated*. <https://web.archive.org/web/20061110104536/http://emotionalliteracyeducation.com/abraham-maslow-theory-human-motivation.shtml>

References

ANALYSIS OF RISKS FOR TECHNICAL SAFETY OF POWER SOURCES AND WELDED STRUCTURES WITH APPLICATION OF NDT&TD FOR PRODUCTION

A.G. Potapievskiy, Yu.K. Bondarenko, Yu.V. Loginova, K.O. Artyukh

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Quality control is a function of management, process of ensuring achievement of organization's goals though evaluation and analysis of activity results, rapid intervention into the production process and taking corrective measures. The main task of control is the process of ensuring achievement of organization's goals and mission. Activity of factory heads and senior management who set the standards, and norms, who check and assess product compliance to them, consists in correction of the staff operation. The need for control is due to the following circumstances: need to organize the process of welded structure fabrication, in keeping with the available reserves and resources of operating safety, user requirements to quality, standard and certification of manufactured products, change of external and internal production conditions, need to reveal tendencies of variable demand and supply of production; forming data bases for further planning of consumption of material and financial resources, improvement of labour and NDT&TD standards, timely intervention into the production process at deviations from the specified norms, etc. and analysis of NDT&TD results. 11 Ref., 3 Fig.

Keywords: production conditions; control, equipment, rules, tools, technological documentation, managers, control system, human factor, moral and psychological climate, risk, risk management

Надійшла до редакції
10.09.2019

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

З 16 по 20 вересня 2019 р. під Києвом проходила III науково-практична конференція «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзу. Конференція була організована Навчальним центром підприємства «ДП-ТЕСТ» за підтримки Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики та за участю кафедри приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Основними темами заходу традиційно були питання гармонізації Європейського та національного законодавства під кутом зору оцінки відповідності; технічні регламенти; метрологія і стандартизація; навчання і сертифікація персоналу; функціонування лабораторій неруйнівного контролю; сучасні засоби, прилади, системи неруйнівного контролю.

Сьогорічна конференція проводилась у формі низки семінарів у сфері сертифікації персоналу з неруйнівного контролю, організації та проведення внутрішніх аудитів у випробувальних лабораторіях, органах сертифікації персоналу та інспектування, майстер-класів з демонстрацією новітнього обладнання та засобів неруйнівного контролю, круглих столів з дискусійних питань роботи служб з неруйнівного контролю на підприємствах України. Крім того, болгарські колеги з атомної електростанції в Козлодуді поділилися своїм досвідом застосування європейських стандартів та виконання вимог безпеки європейських нормативно-правових документів з одночасним дотриманням положень конструкторської документації, закладених виробником обладнання АЕС, яке виготовлялось СРСР.

Після привітання учасників організатором конференції, директором «ДП-ТЕСТ» О.В. Павлієм, робота конференції розпочалась семінаром, присвяченим питанням підготовки, атестації та сертифікації персоналу з неруйнівного контролю, ведучою якого була С. Щупак, керівник групи ІЕЗ ім. Є.О. Патона, відповідальний секретар ТК 78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». В рамках семінару розглядалися такі теми:

1. Перша версія нової редакції стандарту ISO 9712: суттєві зміни та результати засідань робочих груп ISO/TC 135, що займаються його переглядом.

2. ISO/TS 25108:2018 «Вимоги до організацій, що займаються навчанням персоналу з НК».

3. Моніторинг і діагностика стану машин. Вимоги до кваліфікації та сертифікації персоналу. Серія стандартів ISO 18436.

4. ISO 18490:2015 «Неруйнівний контроль. Оцінка гостроти зору персоналу неруйнівного контролю» – задоволення вимог до рівня гостроти зору, визначеного у цьому стандарті, забезпечить виконання вимог до зору, встановлених в ISO 9712 та EN 4179.

5. Перегляд EN 4179 «Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу для неруйнівного контролю».

Особливу увагу учасників конференції викликав докладний порівняльний аналіз нової редакції ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація і сертифікація персоналу НК». Зокрема в майбутній версії стандарту, який, до речі, за планами ISO/TC 135 має бути прийнятий на початку 2021 р., передбачаються такі цікаві зміни:

– мінімальна тривалість підготовки для кожного з методів тепер вимірюватиметься не в годинах, а в днях. Причому один навчальний день може тривати щонайменше 7 і щонайбільше 10 навчальних годин;

– мінімальна тривалість підготовки для кандидатів на перший рівень збільшена, а на другий рівень зменшена: тобто, якщо виходити з середньої тривалості навчального дня 8 год, то тепер кандидати на перший рівень з капілярного, магнітного і візуального методів збільшена до трьох днів (тобто 24 год), а на другий зменшена до двох днів (тобто 16 год), до 8 днів збільшено тривалість навчання на перший рівень для фахівців з ультразвукового і радіографічного методів; крім того, для підготовки на третій рівень кандидати з ультразвукового контролю, що мають сертифікати другого рівня тепер навчатимуться 5 днів (що практично відповідає тим же 40 год), а кандидати на радіографічний контроль – 8 днів;

– мінімальний стаж роботи тепер визначатиметься в годинах, а не місяцях, як було раніше;

– перевірка гостроти зору кандидатів на сертифікацію повинна проводитися згідно з вимогами стандарту ISO 18490 «Неруйнівний контроль. Оцінка гостроти зору персоналу неруйнівного контролю»;

– продовження сертифікації без екзаменів стане неможливе, однак як альтернативу екзаменам вводять так звану структуровану систему накопичення балів; ресертифікація за допомогою структурованої системи накопичення балів як і раніше передбачається тільки для фахівців третього рівня, однак, значних змін зазнав сам зміст системи;

– розробку інструкції контролю для кандидатів на другий рівень розглядатимуть тепер як окрему частину практичного екзамену, яку потрібно проводити і оцінювати окремо від контролю екзаменаційних зразків;

– додаток А «Сектори» знову стає «довідковим», тобто за визначення назви та змісту секторів відповідальність нестиме орган сертифікації. Більше того, в додаток внесені зміни стосовно класифікації секторів продукції, запропоновані ТК 78 від імені України, а саме:

Металеві матеріали:

- литво (c) (феритні і неферитні матеріали);
- поковки (f) (всі типи поковок: феритні і неферитні матеріали);
- зварні з'єднання (w) (всі типи зварних швів, включаючи паяння, для феритних і неферитних матеріалів);
- труби і трубопроводи (t) (безшовні, зварні, з феритних і неферитних матеріалів, включаючи листовий прокат для виготовлення зварних труб);
- оброблена продукція (wp) за винятком поковок (наприклад, плити, бруси, прутки).

Композиційні матеріали:

- композити на основі цементу (cc);
- армовані пластики, такі як фіброармовані полімери (fpr);
- композити на основі металу (mmc);
- композити на основі кераміки (cmc).

Для композиційних матеріалів орган сертифікації повинен визначити вимоги до кваліфікаційних іспитів.

– контроль герметичності більше не розділяють на газоаналітичний метод і контроль тиском;

– введено додаток F «Тривалість навчання за способами НК» для таких технологій, як ФАР, TOFD, цифрова радіографія тощо.

Це далеко не весь перелік змін, очікуваних у новій, вже п'ятій редакції стандарту ISO 9712, що обговорювалися на семінарі.

Система сертифікації або схвалення (від англійського approval) персоналу, що виконує неруйнівний контроль в аерокосмічній галузі, регламентована стандартом EN 4179 «Аерокосмічна серія. Кваліфікація і атестація персоналу для неруйнівного контролю». Доповідь про зміни у цьому стандарті, а також його значення для впровадження в Україні системи підтвердження кваліфікації фахівців, що здійснюють неруйнівний контроль під час технічного обслуговування літальних апаратів, що відповідає вимогам EASA – Європейської агенції авіаційної безпеки – зробив голова Української національної аерокосмічної ради з неруйнівного контролю (УНАРНК), керівник сектору неруйнівного контролю ДП «Антонов» В.П. Коваленко. Він ознайомив учасників конференції з історією появи стандарту та з його тісним

зв'язком з американським стандартом NAS 410, прийняття якого і спричинило достроковий перегляд європейського стандарту, а також про зусилля міжнародної аерокосмічної спільноти для гармонізації вимог до безпеки польотів, наслідком яких, зокрема, і стала уніфікація вимог стосовно схвалення персоналу з неруйнівного контролю льотної галузі.

Ця доповідь, а також розроблені В.П. Коваленко за участі співробітників ДП «Антонов» процедури обговорювалися також на засіданні ініціативної групи з підготовки загальних зборів УНАРНК, які відбулись в рамках 9 Національної конференції з неруйнівного контролю 21 листопада 2019 р.

На семінарі розглядалися також нормативні документи, що регламентують систему підготовки персоналу з неруйнівного контролю, зокрема, мова йде про недавно прийнятий ISO/TS 25108:2018 «Вимоги до організацій, що займаються навчанням персоналу з НК». Документ, хоча і не набув статусу міжнародного стандарту, однак, є надійним інструментом підтвердження відповідності підготовки персоналу вимогам ISO 9712. Це особливо актуально для випадків, коли орган сертифікації повинен прийняти рішення про визнання підготовки кандидатів на сертифікацію, що проходять курс навчання у невідомих йому організаціях, у тому числі іноземних.

Технічна специфікація (так розшифровується скорочення TS) містить вимоги і рекомендації для організацій, що займаються навчанням персоналу з неруйнівного контролю з метою гармонізації і підтримання загального стандарту підготовки персоналу з неруйнівного контролю для потреб промисловості. Він встановлює також мінімальні вимоги щодо ефективно структурованої підготовки персоналу з неруйнівного контролю, яка забезпечує право на допуск до кваліфікаційних екзаменів, що ведуть до сертифікації третьою стороною відповідно до визнаних стандартів.

ISO/TS 25108:2018 визначає вимоги до ознайомчого інструктажу персоналу, що бажає пройти навчання, вимоги до викладацького складу, навчальних програм, роздаткового матеріалу, системи менеджменту, а також докладний перелік технічного оснащення для кожного окремого методу НК. Наприклад, система ознайомлення (інструктажу) повинна забезпечувати, щоб після отримання заявки на навчання кандидати були забезпечені однозначною інформацією/інструкціями про:

- вимоги до вихідних знань (тобто математики, знання матеріалів та технологічних процесів, радіаційна безпека);
- розміри оплати навчальних курсів, включаючи все, що входить в оплату, а також методи оплати (не повинно бути ніяких прихованих додаткових вимог, що вимагатимуть подальшої оплати,

а таблиця з розцінками учбових курсів повинна бути опублікована).

- дати і години відвідання курсів, а також чіткі інструкції стосовно місця проведення навчальних курсів.

- умови транспортування (включаючи інформацію щодо паркування), проживання і харчування.

- обладнання НК, яке повинен мати із собою (кандидат) та/або докладний перелік обладнання НК, що його надає учбова організація;

- засоби особистого захисту, за необхідності, а також докладний опис важливих вимог безпеки, які стосуються розташування навчальних курсів, особливо, якщо навчальні курси охоплюють використання джерел іонізуючого випромінювання або речовин, що становлять загрозу для здоров'я;

- підручники (посібники), які повинен мати при собі студент;

- ім'я та контактну інформацію щодо представника учбової організації, від якого можна отримати додаткову інформацію до початку та під час навчальних курсів.

Ще однією перевагою застосування цього нормативного документа є система оцінювання кандидатів перед видачею посвідчень про навчання, оскільки більшість учбових центрів, що працюють в системі того чи іншого органу сертифікації, як правило, такого оцінювання не здійснюють або не документують. Хоча ідея незалежності сертифікації та відмежування її від навчання якраз і передбачає, що орган сертифікації, з одного боку, не повинен регламентувати діяльність навчальних організацій, обмежуючись лише вимогами до учбових програм, а з другого повинен бути впевнений, що навчання було якісним, а знання кандидата були перевірені, що, власне, і підтверджується свідоцтвом про навчання.

Семинар-практикум «Практичні аспекти організації та проведення внутрішніх аудитів згідно з ДСТУ ISO 19011 в органах з оцінки відповідності (ISO/IEC 17020, ISO/IEC 17024, ISO/IEC 17025) провела генеральний директор ТОВ «Глобал Сертифік Дніпро», аудитор і консультант з великим досвідом роботи у сфері оцінки відповідності та систем менеджменту якості М. Лаврентьева.

Внутрішній аудит відіграє ключову роль у зробці, впровадженні та підтриманні системи управління якістю у будь-якій організації, чи то орган сертифікації, чи промислове підприємство, чи заклад освіти. Філософія управління якістю ґрунтується на усуненні проблеми ще до того, як вона виникла. А там, де проблема вже існує, особливого значення набувають такі аспекти як раннє виявлення, глибина проблеми, пошук корінної причини. Основні принципи аудиту, рекомендації щодо його організації і проведення викладені

в ДСТУ ISO 19011 «Настанови щодо здійснення аудитів систем управління якістю та/чи навколишнім середовищем». Учасники семінару отримали нагоду обговорити основні аспекти реалізації процесу внутрішнього аудиту при впровадженні та аналізі практичних питань функціонування системи менеджменту якості, а також набути навичок планування, проведення та документування внутрішніх аудитів.

Другий день роботи конференції був цілком присвячений майстер-класам та демонстрації новітнього обладнання та засобів неруйнівного контролю. Представники компанії Olympus, J. Böhm і T. Bodolai виступили з доповідями про нові розробки відеоендоскопів та обладнання для ультразвукового контролю. Пан J. Böhm представив технологію 3D-моделювання у відеоендоскопах серії IPLEX NX. Побудова 3D-моделі зони вимірювання дозволяє підвищити наочність і продуктивність контролю, проводити високоточні вимірювання дефектів, особливо в умовах складної геометрії об'єкта контролю.

Пан T. Bodolai представив два рішення, які ґрунтуються на технології ультразвукового контролю за допомогою фазованих антенних решіток. У сканері Flexofom використані гнучкі фазовані решітки і спеціальні водяні призми для контролю вигинів труб на наявність корозійних уражень. Сканер Edgeform використовує фазовані решітки у заповненій водою камері для контролю проклеювання в автомобільній промисловості. Це рішення було розроблено на замовлення компанії Volkswagen і успішно застосовується багатьма автовиробниками Європи.

Продукцію MR Chemie GmbH представив Ю. Яременко, менеджер з продажу для регіонів Центральної і Східної Європи та країн Балтії. Насамперед це нові дефектоскопічні матеріали для капілярного та магнітопорошкового методів НК, що не містять небезпечних для людини та довкілля компонентів. Крім того, він виступив з презентацією про розробку та впровадження революційно нового методу контролю зародження та утворення дефектів, що виникають під час випробування об'єктів шляхом циклічних навантажень.

О.В. Павлій виступив з презентацією лінійки продукції FUJIFILM (Японія) «Рентгенівська технічна плівка і реактиви. Серія IX, IX HD». Зокрема до переваг плівки IX600 можна віднести високу чутливість і контрастність, а екологічна плівка серії HD за рахунок зменшеного вмісту срібла, коштує дешевше плівок аналогічного класу інших виробників, забезпечуючи при цьому притаманну класу якість зображення. Крім того, він представив увазі учасників огляд потужних (діапазон енергій 120...350 кВ) і водночас компактних рент-

генівських генераторів серії Site-x CP виробництва TELEDYNE ICM (Бельгія).

Фірма «УЛЬТРАКОН» показала нову розробку – компактний багатофункціональний ультразвуковий дефектоскоп УД2-50. Прилад з яскравим кольоровим екраном і акумуляторним живленням призначений для виявлення несущальностей у литві, прокаті, зварних з'єднаннях металоконструкцій і напівфабрикатів, виробів з пластику і композитів.

Ще один день конференції зайняли питання, пов'язані з нормативним забезпеченням атомної енергетики. На семінарі партнерів з Болгарського товариства з дефектоскопії учасники познайомились з досвідом болгарських підприємств у впровадженні європейських практик неруйнівного контролю на прикладі роботи АЕС «Козлодуй». Спікери С. Ангелов, керівник сектору неруйнівного контролю АЕС «Козлодуй» та О. Алексієв, керівник екзаменаційного центру з неруйнівного контролю.

Особливу зацікавленість викликала доповідь С. Ангелова «Спільне використання російських і європейських стандартів з неруйнівного контролю в галузі атомної енергетики». У Болгарії в атомній енергетиці відповідно до вимог державного регуляторного органу використовуються нормативні документи на неруйнівний контроль Радянського

Союзу та Російської Федерації: ПНАЕГ 7-010-89 та НП-089-15. Ці документи, відповідно, вимагають застосування стандартів ГОСТ (СРСР та РФ). Водночас дається можливість використання європейських та міжнародних стандартів паралельно з російськими нормативними документами. З іншого боку, у Європейському союзі органи інспектування повинні бути акредитовані згідно з EN ISO 17020. Це зобов'язує використовувати стандарти EN ISO. Як відомо, нормативні документи цих двох систем відрізняються вимогами до обладнання, контрольних зразків, дефектоскопічних засобів. Тому, підприємствам болгарської атомної енергетики довелося докласти значних зусиль, щоб поєднати застосування європейських і російських стандартів: було проведено порівняльний аналіз з метою виявлення відповідностей і паралелей у вимогах до обладнання та засобів контролю для всіх методів неруйнівного контролю, що застосовуються на АЕС. Результати цього аналізу лягли в основу презентації пана С. Ангелова.

На завершення, хочеться зазначити, що проходила конференція у курортно-готельному комплексі «Бабусин сад», що під Києвом. Поєднання роботи з відпочинком, приємне спілкування та обмін інформацією стало запорукою успіху заходу.

С.О. Щупак,
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

Х МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»

Україна, Одеса, готель «Аркадія»
14 – 18 вересня 2020 р.



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 червня 2020 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць дев'яти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті:
<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.06.2020 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 17.07.2020 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 15.09.2020 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11
м. Київ, 03150, Україна
тел. / факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2020>

МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2019

З 19 по 22 листопада в м. Києві на території МВЦ відбувся XVIII Міжнародний промисловий форум — захід, який з 2005 р. входить до переліку провідних світових промислових виставок, офіційно сертифікованих і визнаних Всесвітньою асоціацією виставкової індустрії (UFI), і рік за роком залишається найбільшою в Україні подією.

Виставка організована Міжнародним виставковим центром, який забезпечив прекрасні умови для багатьох компаній і організацій, що не перший рік вибирають Промисловий форум як майданчик для демонстрації своїх новітніх розробок і місце зустрічі з широким колом фахівців і потенційних партнерів. Тематика форуму охоплювала демонстрацію широкого спектру новітніх технологій металообробки, машинобудування, виробництва інструментів, зварювання й обробки поверхні, приводного обладнання та промислової автоматизації, вантажно-розвантажувального обладнання, техніки безпеки і пов'язаних з нею промислових технологій.

Всього у виставці взяли участь 383 компанії, підприємств та організацій. Вони представляли експонати з 31 країни. Чехія і Туреччина сформували свої національні експозиції. Загальна площа форуму перевищила 23000 м². Загальна кількість відвідувачів складала понад 12500.

Зупинимось дещо докладніше на розділі форуму «Укрзварювання». У ньому взяли участь понад 20 українських експонентів та одна компанія з Білорусі. Серед них:

- ТОВ «Бінцель Україна ГмбХ» – торгове підприємство в Україні всесвітньо відомого провідного виробника комплектуючих до зварювального обладнання (зварювальні пальники для ручного, автоматичного та роботизованого зварювання плавким та неплавким електродом, зварювальні трактори, робопериферія, електродотримачі, плазмотрони, установки Jackle для зварювання MIG/TIG/MMA (160...600 А) та плазмової різки (25...300 А) та інше;

- ТОВ «Фроніус Україна» — реалізує стандартне та інвентарне обладнання для різноманітних способів зварювання, а також надає повний спектр послуг щодо обслуговування, ремонту та оренди зварювального обладнання. Має власні філії в м. Стрий та м. Дніпро, а також партнерів зі збуту та сервісу в Запоріжжі, Києві, Одесі та Сумах;

- ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК» — провідна компанія в Україні по розробці та виробництві порошкових дротів для зварювання, наплавлення, напилення



та порошкових стрічок для наплавлення; по виробництву легких металоконструкцій;

- ПрАТ «Машинобудівний завод «ВІСТЕК» — спеціалізується на випуску круглоланкових ланцюгів різного призначення, виробництві зварювальних електродів, зварювального дроту та дроту загального призначення, ковально-пресовому виробництві;

- ТОВ «ВІТАПОЛІС» — провідний виробник в Україні дротів для зварювання вуглецевих, низьколегованих, високоміцних, нержавіючих, жаростійких, броньових сталей та сплавів на основі нікелю. Продукція ТМ «ХОРДА» сертифікована TÜV (Німеччина), CWB (Канада), Регістром судноплавства України та внесена до Державних будівельних норм (мостові конструкції);

- ТОВ «ДЗЗУ ІЕЗ ім. Є.О. Патона» виробляє великий асортимент професійного зварювального обладнання і є одним із лідерів ринку на території України та країн СНД. Впроваджуючи провідні технології та конструкторські розробки, завод виробляє зварювальне обладнання високої якості з оптимальними технічними характеристиками, що задовольняють потреби як великих промислових підприємств, так і приватних осіб;

- ТОВ «ЗОНТ» — розробка та виробництво машин для термічного різання, виробництво машин для плазмового різання, комплексів для лазерного різання з волоконними лазерами, машин для газокисневого різання, столів розкрійних з вбудованою системою вентиляції та фільтрації, реалізація





систем плазмового різання фірм Hypertherm, Kjellberg, OTC Daihen, капітальний ремонт та модернізація машин для термічного різання;

- ТОВ «ДОНМЕТ» — завод автогенного обладнання, підприємство, на якому на основі власних запатентованих розробок серійно налагоджено виробництво десятків найменувань обладнання для різання, зварювання та пайки металів, з гарантованим терміном користування до 24 місяців. Газозварювальне обладнання підприємства і система керування якістю сертифіковані в системі УкрСЕПРО по ДСТУ ISO 9001-2001;

- ТОВ «НАВКО-ТЕХ» розробляє та виготовляє спеціалізоване устаткування: установки для зварювання прямолінійних швів (димоходи, обичайки та ін.); установки для зварювання кільцевих швів (балони, ресивери, крани та ін.); установки для наплавлення на циліндричних, конічних та плоских поверхнях по спіралі; зварювальні комплекси на базі промислових роботів FANUC; апаратуру для зварювання (пристрої охолодження, зварювальні обертачі та ін.);

- ТОВ «ОЛІВЕР» (Білорусь) – спеціалізується на виробництві зварювального дроту та електродів широкої номенклатури, зварювального устаткування, аксесуарів та приладдя для зварювання;

- ТОВ «САММІТ» – спеціалізоване підприємство з продажу, обслуговування електрозварювального обладнання відомих брендів з Фінляндії, США, Німеччини та інших країн. Перелік обладнання вітчизняного та іноземного виробництва, яке постачається: зварювальні інвертори, напівавтомати, зварювальні автомати, зварювальні трактори; машини контактного зварювання; обладнання для плазмового різання; редуктори, вентилі, пальники, різачки та ін.; газові змішувачі WITT;



зварювальні матеріали (дріт, флюс, електроди); роботи для зварювання. Замовниками компанії є більш ніж 800 металургійних, машинобудівних та інших підприємств;

- ТОВ «СВ ТЕХНОЛОГІЯ» – займається розвитком, виробництвом та реалізацією широкого спектру зварювального обладнання, пристроїв і матеріалів, засобів захисту, інструменту, абразивного матеріалу та ін. Працює на ринку України з 1997 р. Має декілька торгових філіалів;

- НТЦ «ПРОМАВТОСВАРКА» – протягом останніх чотирьох років освоїв новий напрямок – розробка обладнання та технології для нанесення покриттів методом металізації. Здійснюється виробництво металізаторів, які успішно застосовуються на підприємствах України для нанесення антикорозійних покриттів з цинку, алюмінію, бронзи, а також для відновлення зношених деталей та придання деталям особистих властивостей;

- ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» (раніше ТОВ «ФРУНЗЕ-ЕЛЕКТРОД») є провідним підприємством України з виготовлення зварювальних електродів спеціального та загального призначення з високими зварювально-технологічними властивостями за конкурентоспроможними цінами, які з успіхом застосовуються при виготовленні та ремонті відповідальних металоконструкцій на підприємствах машинобудівної, хімічної та енергетичної (у тому числі атомної) галузей України та країн СНД;

- ТОВ «ТЕРМАКАТ Україна, ГмБХ: торгівельна марка всесвітнього виробника (THERMACUT®) апаратів плазмового різання, а також витратних деталей, комплектуючих та аксесуарів для термічного різання металу, що представлені у трьох сегментах (лазер, плазма, газ);

- НВФ «ТЕХВАГОНМАШ» – компанія представляє повний набір послуг: від етапу проектування до етапу проведення шеф-монтажних та пусконаладжувальних робіт, включаючи виробництво спеціального технологічного обладнання. Основними напрямками діяльності є: комплексне проектування та оснащення підприємств транспортно-машинобудівництва; спеціальне технологічне обладнання для виробництва залізничного транспорту; технологічне обладнання для ремонту вагонів; обладнання для виробництва причіпної та навісної техніки комерційного автотранспорту; роботизовано-зварювальні комплекси;

- НВП «ТЕХМАШ» – машини плазмового та газокисневого різання металу. Виробництво, продаж, розробка, обслуговування, модернізація, постачання запчастин та витратних матеріалів;

- ТОВ «ТРИАДА-ЗВАРКА» в Україні є ексклюзивним дистриб'ютором турецького виробника зварювальних матеріалів заводу «ASKAYNAK». Завод



«ASKAYNAK» є власністю компанії «LINCOLN ELECTRIC» (США). ASKAYNAK – світовий лідер з виробництва зварювального дроту та електродів;

- ТОВ «ФОРСАЖ УКРАЇНА» – власне виробництво зварювального обладнання ТМ «Forsage» із застосуванням повного циклу обробки деталей. Сучасне виробництво з застосуванням комплексів: лазерна різка, листозгин ЧПК, гільотина ЧПК, вакуумний пристрій просочення трансформаторів, автоматична машина встановлення СМД-деталей, піч запікання СМД з ЧПК, фрезерний верстак з ЧПК, різьбонарізний верстат з ЧПК. Потужності підприємства дозволяють виготовити будь-яку конфігурацію зварювального обладнання на замовлення у найкоротші строки;

- ГО «ТОВАРИСТВО ЗВАРНИКІВ УКРАЇНИ» – це громадська організація, що об'єднує вчених, фахівців та робітників у галузі зварювання та споріднених процесів в Україні для кращого обміну науково-технічною інформацією та формування консолідованої технічної політики в сфері зварювального виробництва; задоволення та захисту творчих інтересів учених та інженерів; сприяння покращенню умов роботи членів Товариства, розвитку науки та освіти, впровадження наукових, технічних та методичних досягнень в практику; популяризації професій, удосконаленню системи професійної підготовки та перепідготовки кадрів; співробітництва з національними зварювальними товариствами інших країн та з міжнародними зварювальними організаціями.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України представив на форумі інноваційні технології

для автоматизованого пресового зварювання металевих труб відповідального призначення (на фото ліворуч – процес зварювання дугою, що обертається в магнітному полі), а також зварювання пластмасових труб. На стенді була представлена також видавнича діяльність Інституту, зокрема журнали «Автоматичне зварювання», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» та «Сучасна електрометалургія». Великий інтерес у відвідувачів виставки визвала демонстрація на стенді художніх виробів з титану, виконаних з використанням ПІГ зварювання художником-зварником Дмитром Кушніруком.

Молоді зварювальники України взяли участь в XIII конкурсі «Золотий кубок Бенардоса-2019», організованому Товариством зварників України (ТЗУ) і Одеським обласним відділенням ТЗУ. Конкурс проходив в наступних номінаціях: ручне дугове зварювання покритим електродом (метод 111 / SMAW); дугове зварювання електродом, що плавиться в активних газах (метод 135 / SMAW); дугове зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах (метод 141 / SMAW).

Додатково було проведено два позаконкурсних заходи: конкурс на зварювальному тренажері «SOLKAMATIC»; конкурс плазмового різання на обладнанні «JASIC».

У конкурсі взяли участь 27 зварників з 13 підприємств і трьох професійно-технічних навчальних закладів України. Всі переможці були нагороджені призами, наданими спонсорами конкурсу.

На закінчення відзначимо, що порівнюючі Промисловий форум-2019 з раніше проведеними, можна відзначити зростаючу кількість його учасників, розширення географії і підвищену увагу експонентів до демонстрації інноваційних технологій, включаючи автоматизацію та роботизацію зварювальних процесів, розробку 3D технологій, мінімізацію впливу людського фактора, раціональне використання виробничих площ.

О.Т. Зельніченко, В.М. Ліподаєв



ОБ ОТМЕНЕ ГОСТов И ПРОБЛЕМЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОБУЧЕНИЯ И АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Проблема использования нормативных документов (НД) при обучении и аттестации специалистов неразрушающего контроля (НК), проводимых ООО «Технический комитет «Спецмонтаж» возникла еще тогда, когда Постановлением Кабинета Министров Украины от 9 декабря 2014 г. № 695 была принята Программа деятельности Кабинета Министров Украины, одобренная постановлением Верховного Совета Украины от 11 декабря 2014 г. № 26-VIII. Согласно Программе, предусматривалась отмена действия на территории Украины стандартов СССР, разработанных и изданных до 1992 г.; принятие в статусе национальных 1500 стандартов, гармонизированных с европейскими стандартами (см. [www.uas.org.ua\(pitannya_vidpodidi\)](http://www.uas.org.ua(pitannya_vidpodidi))); и создание полнотекстовой базы (порядка 28 тыс.) стандартов. В декабре 2014 г. А. Яценюк, бывший в то время премьер-министром Украины, заявил о намерении до 2016 г. полностью отказаться от советской системы стандартизации и перейти на европейские стандарты.

Однако большинство национальных НД, используемых при обучении и аттестации специалистов НК (НПАОП, ДБН, ВБН, ДСТУ, ГСТУ, РТМ, СНиП и др.), содержит ссылки на ГОСТы, которые, согласно Программе, должны быть отменены.

По логике вещей в отечественных НД должны были бы быть введены соответствующие изменения, касающиеся замены ГОСТов на европейские (EN), международные (ISO) и гармонизированные (ДСТУ EN ISO) стандарты. Однако комплекс требований к НК, указанный в стандартах EN, ISO или ДСТУ EN ISO, кардинально отличается от аналогичных требований в отечественных НД, в том числе ГОСТов, а ввести в НД изменения или осуществить их переработку в такие сроки, как указано в Программе, не представлялось возможным. Более того, большинство объектов (машин, механизмов, оборудования повышенной опасности, трубопроводов и металлических конструкций), с которыми работают специалисты в области НК, разработаны и построены по действующим в настоящее время в Украине национальным нормативам, которые также кардинально отличаются от нормативов EN и ISO.

Поэтому большинство организаций и предприятий Украины продолжали проводить работы

по эксплуатации, диагностированию, ремонту и контролю качества названных объектов по существующим НД с ГОСТам, которые должны быть отменены. И вполне понятно ежегодное продление ГП «УкрНИУЦ» сроков действия отмененных ГОСТов.

Такая ситуация продолжалась до 01.01.2019г, когда ГП «УкрНИУЦ» приняло решение окончательно прекратить продление сроков действия отмененных ГОСТов. Но в ГП «УкрНИУЦ» продолжали поступать предложения о продлении сроков действия ГОСТов и после 01.01.2019.

Учитывая это, а также рекомендации Минэкономразвития, ГП «УкрНИУЦ» своими приказами возобновило действие ряда ГОСТов, разработанных до 1992 г., сроком до 01.01.2020, 01.01.2021, и до 01.01.2022 гг. В частности, продлено до 2020 г. действие ГОСТ 18442-80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования». Действие остальных ГОСТов по НК не продлено. Но работы по НД с отмененными ГОСТами большинством организаций и предприятий продолжают (исключение составляют организации, имеющие заказы от зарубежных фирм и работающих по стандартам EN и ISO). Проблема дальнейшего использования НД с отмененными ГОСТами заострилась.

На этой проблеме АЦНК ТК «Спецмонтаж» неоднократно акцентировал внимание специалистов в сфере НК, а также заинтересованных организаций на конференциях и семинарах по НК, в том числе, на конференции в Одессе (10–14 сентября 2018 г.) в статье «О применении нормативных документов при проведении обучения и аттестации специалистов неразрушающего контроля в ООО «Технический комитет «Спецмонтаж» (В.А. Цечаль, С.К. Ярмолка в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», № 4, 2018 г.). Об отмене ГОСТов и альтернативе их замены излагается также в Информационном бюллетене УТ НКТД № 1/2019 «Повідомлення від ТК-78» секретарем ТК-78 С.А. Щупак. Однако конкретные рекомендации, как решить эту проблему, отсутствовали.

На сайте ГП «УкрНИУЦ» ([www.uas.org.ua\(pitannya_vidpovidi\)](http://www.uas.org.ua(pitannya_vidpovidi))) опубликованы следующие рекомендации:

«Пунктом 1 частины першої статті 16 Закону встановлено, що підприємства, установи та органі-

зації мають право у відповідних сферах діяльності та з урахуванням своїх господарських і професійних потреб організувати та виконувати роботи із стандартизації, зокрема: розробляти, приймати, перевіряти, переглядати та скасовувати стандарти, кодекси ustalеної практики, технічні умови і зміни до них, установлювати процедури їх розроблення, прийняття, перевірки, перегляду, скасування та застосування, ... нормою Закону суб'єкт господарювання має право отримати свій власний документ, розроблений за своїми власними правилами» («Закон» – має в виду Закон о стандартизації).

Учитывая изложенное, ООО «ТК «Спецмонтаж» принял решение взамен отмененных ГОСТов разработать и использовать стандарты предприятия СТП (во всяком случае, до тех пор, пока предприятия и организации будут выполнять работы на объектах, разработанных и построенных по прежним национальным нормативам, отличающимся от нормативов EN и ISO). В СТП вносятся нормы по «своим собственным правилам», т. е. отвечающим требованиям предприятий и организаций, регионов, ведомств и т. д., в конкретном случае – «Техническому комитету «Спецмонтаж». Используются следующие подходы. В первом меняется только обложка, а содержание используемого документа, который заменяется на СТП, сохраняется. Во втором меняется и обложка и содержание использованного документа. В конкретном случае ООО «ТК «Спецмонтаж» использует отмененные ГОСТы, которые отвечают требованиям НД, с которыми работает ООО «ТК «Спецмонтаж».

В ООО «Технический комитет «Спецмонтаж» разработаны:

- СТП ГОСТ 14771-2019 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. г. Киев, 2019 г.;

- СТП ГОСТ 16037-2019 Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. г. Киев, 2019;
- СТП 7512-2019 Контроль неразрушающий. Радиографический метод. г. Киев, 2019 г.
- СТП 18442-2019 Контроль неразрушающий. Капиллярный метод. г. Киев, 2019 г.
- СТП 21105-2019 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. г. Киев, 2019 г.

Действие разработанных СТП распространяется только на конкретные предприятия, регионы, ведомства и т. д., которые несут полную ответственность за содержание и использование СТП.

Все изложенное выше о СТП, как уже указывалось, касается тех объектов, которые разработаны и построены по действующим в настоящее время нормативам, отличающимся от требований стандартов EN и ISO. Объекты, которые будут разрабатываться и строиться по новым нормативам, учитывающим требования стандартов EN и ISO, должны будут полностью перейти на эти стандарты, что должно быть отражено в содержании всех национальных НД.

В заключение хочу заметить, что в последнем абзаце упомянутой статьи в журнале УТ НКТД №3/2018 сказано: «От редакции. Предлагаемый материал не претендует на полноту и законченность. Редакция журнала будет признательна читателям за высказанные замечания и дополнения к применению действующих нормативных документов».

Мне представляется, что настоящая статья дополняет предыдущую, как бы завершая обсуждение проблемы использования НД. Хотелось бы стать участником дискуссии на эту тему, тем более, что преимущества стандартов EN и ISO – очевидны, и в обозримом будущем в Украине осуществится переход на эти стандарты.

В.А. Печаль,

ООО «Технический комитет «Спецмонтаж»

Передплата — 2020 на журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»

www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk

Передплатний індекс 74475

Україна		Зарубіжні країни	
на півріччя	на рік	на півріччя	на рік
400 грн.	800 грн.	30 дол. США	60 дол. США

У вартість передплати включена доставка рекомендованою бандероллю.

Передплату на журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» можна оформити безпосередньо через редакцію або по каталогах передплатних агентств: ДП «Преса», «Пресцентр», «Меркурій» (Україна); каталог зарубіжних видань «Белпочта» (Білорусь); каталог АТ «Казпочта» видання України (Казахстан); каталог «Роспечать» (РФ).

Правила для авторів, ліцензійні угоди, архівні випуски журналів

на сайті видавництва www.patonpublishinghouse.com.

У 2020 р. у відкритому доступі випуски журналів з 2009 по 2018 рр. в форматі *.pdf.

Контакти:

Тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Підписано до друку 11.12.2019. Формат 60×84/8.

Офсетний друк. Ум. друк. арк. 8,84.

Друк ТОВ «ДІА».

03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В АНТАРКТИЦІ

На початку 2019 р. на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» на острові Галіндез в архіпелазі Аргентинських островів виконано технічне діагностування резервуара РГС-150 та днища резервуара РВС-200 з наступним його антикорозійним покриттям.

Технічне діагностування є обов'язковим видом періодичного контролю і проводиться з метою забезпечення безпеки експлуатації сталевих резервуарів для зберігання нафтопродуктів та запобігання забрудненню довкілля. Воно передбачає проведення наступних основних робіт:

- вивчення проектної та експлуатаційної документації на резервуар;
- інструментальне обстеження стану фундаменту та основи резервуара;
- інструментальне обстеження стану металоконструкцій резервуара методами неруйнівного контролю з метою виявлення дефектів та пошкоджень в конструкційних елементах та зварних з'єднаннях;
- розрахункова перевірка статичної міцності стінки резервуара;
- оцінка технічного стану резервуара та обґрунтування його придатності для подальшої експлуатації і визначення допустимих умов експлуатації.

Роботи виконані на замовлення Національного антарктичного наукового центру МОН України співробітниками Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (провідний інженер-технолог, фахівець з неруйнівного контролю Посипайко Ю.М.) та ТОВ ТВП «Зінга Метал і К» (головний технолог Андреев А.М.)

Резервуар РГС-150 споруджений в 1978–1979 рр. за технологією BRAITHWAITE, що передбачає складання стінки зі сталевих штампованих елементів квадратної форми розміром 1220×1220 мм, з діагональними ребрами жорсткості висотою 40 мм. Така технологія була поширена тоді у Великій Британії. Вона дозволяє складати ємності різного об'єму без зварювання та підймальних механізмів. Стальні квадратні елементи скріплюються між собою гвинтами з використанням еластичних ущільнюючих прокладок та герметика. Товщина металевих листів, з якого шляхом гарячого штампування виготовлені такі елементи, складає 5 мм.

В 1986 р. в резервуарі змонтовано і зварено внутрішню оболонку з листів корозійностійкої сталі товщиною 3 мм.

Резервуар має форму паралелепіпеда, а його зовнішні розміри – 7340×7340×3660 мм. Гранична висота наливу: 3600 мм. Конструктивну міцність

резервуару надають внутрішні косі та поперечні тяги, виготовлені з кутника 70×70 мм.

Резервуар призначено для приймання і зберігання дизельного пального.

Відхилення поверхні фундаментних стрічок від горизонтальної площини виміряне за допомогою нівеліра SL 60-2, Rank Precision Industries Ltd., U.K. В зоні передньої стінки відхилення становить (0...–9) мм, а в зоні задньої – (–106...–115) мм. Тобто, горизонтальна площина фундаменту нахилена по осі резервуара на 106...115 мм. Такий нахил фундаменту, очевидно, був закладений в його проекті з метою нахилу самого резервуара в сторону зливних патрубків.

Відхилення стінок резервуара від вертикалі, виміряна за допомогою теодоліта Т30, відповідає нахилу фундаменту: передня стінка нахилена в середину резервуара (–67...–70) мм, а задня – на зовні (+55...+70) мм. Бокові стінки мають незначне відхилення від вертикалі (–8...+25) мм.

Поверхня металу зовнішньої оболонки резервуара не має дефектів прокату, штампування чи відхилення форми. На поверхні відсутні сліди корозії та протікань пального.

Внутрішня оболонка стінок і днища резервуара змонтована і зварена з листів антикорозійної сталі розміром 2000×1300 мм товщиною 3 мм. Між собою листи з'єднані накладними швами, а зі сталевими елементами зовнішньої оболонки – швами «в прорізь». Таким чином, всі зварні шви кутові з катетами 3...4 мм.

Недопустимих дефектів в зварних з'єднаннях та металі не виявлено. Найбільш поширеним недоліком зварних з'єднань є нерівномірність форми валика посилення шва, що, проте, не може вплинути на експлуатаційні характеристики з'єднання. Не виявлено корозійних пошкоджень металу та швів.

Зварні з'єднання в цілому відповідають вимогам нормативних документів: ВБН В.2.2-58.2-94 «Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа» та ГОСТ 5264-80 «Ручне дугове зварювання. З'єднання зварні. Основні типи, конструктивні елементи та розміри». В швах не виявлені недопустимі дефекти зварних з'єднань (поверхневі тріщини, пори, підрізи, пропалини, не заварені кратери та інші), що перевищують допустимі нормами розміри.

Аналіз результатів технічного діагностування стану резервуара РГС-150, розташованого на УАС «Академік Вернадський», дозволив зробити висновок, що всі елементи резервуара знаходяться в задовільному технічному стані, стінки, днище та



покрівля не мають недопустимих деформацій чи дефектів, що можуть вплинути на надійність експлуатації та працездатність резервуара. На металоконструкціях резервуара не виявлені сліди протікання пального, що свідчить про герметичність внутрішньої оболонки.

Другий резервуар РВС-200 встановлено на УАС «Академік Вернадський» в 2007 р. Резервуар спроектовано ВАТ УкрНДПроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського та ВАТ Інститут транспорту нафти і споруджено в формі двостінного вертикального циліндра, з двома днищами і двома покрівлями, за принципом «стакан в стакані».

Геометричні параметри внутрішнього резервуара: висота стінки – 5,96 м; внутрішній діаметр – 6,63 м; товщина листів стінки і днища – 5 мм; відстань між внутрішньою та зовнішньою стінками – 0,16 м.

Стінки резервуара змонтовано з окремих листів розміром 3000×1500 мм, товщиною 5 мм і з'єднані ручним дуговим двостороннім зварюванням на монтажному майданчику. Всі зварні з'єднання стикові з повним проплавом.

Днище внутрішнього резервуару виготовлено із сталевих листів, товщиною 5,0...5,2 мм. Листи зібрані в полоси стиковими зварними з'єднаннями, а між собою полоси з'єднані внапусток.

Повне технічне діагностування резервуара виконано в 2016 р. Головним висновком діагностування стала необхідність першочергового антикорозійного захисту днища внутрішнього резервуара.

Візуальний контроль днища резервуара показав, що поверхня металевих листів уражена язвою корозією глибиною до 2,0 мм. Корозійні язви різної глибини згруповані на окремих ділянках площею 10...30 кв. см і розкидані по листах, переважно, вздовж зварних з'єднань.

Зварні з'єднання в цілому відповідають вимогам ГОСТ 5264-80. В швах не виявлені недопустимі виробничі поверхневі дефекти зварних з'єднань – тріщини, підрізи, пропалини, не заварені кратери, пори виробничого походження, тощо. Водночас в швах зварних з'єднань також виявлені окремі корозійні язви глибиною до 2,0 мм (більше 10 шт.). Вздовж швів є бризки металу.

Контроль герметичності зварних з'єднань днища виконано пузирковим методом (способом ва-

куумної камери). Течі у днищі внутрішнього резервуара відсутні.

Під час діагностування днища виконано випробування пристрою запису візуальної інформації ВИК/ТВА-1. Пристрій переміщувався по поверхні днища вручну і був обладнаний відеокамерою та блоком бездротової передачі інформації на смартфон. Такий пристрій дозволяє записати інформацію про стан зварних з'єднань важкодоступних або розташованих поза доступом фахівців з неруйнівного контролю об'єктів, а аналізувати її за допомогою комп'ютерної техніки в лабораторних умовах. Він також дозволяє фото- та відеофіксацію технологічних процесів підготовки до контрольних та ремонтних операцій, запис візуальної інформації на інші цифрові носії та її архівацію з метою наступного розшифрування.

Для підготовки днища до нанесення антикорозійного покриття було виконано піскоструминне його очищення і наступне знежирення поверхні ацетоном.

ТОВ ТВП «Зінга Метал і К» запропонувало технологію комбінованого покриття, першим шаром якого є суспензія лускатого металевого неокисленого цинку в системі полімерних в'язучих, так зване «холодне цинкування» матеріалом Liquid Zinc[®]. Наступними шарами є двокомпонентне рідкокерамічне покриття «ZingaMetall CeramCoat CN1-N».

Матеріал Liquid Zinc[®] утворює з очищеною сталеву поверхню стійкий хімічний зв'язок. Процентний вміст цинку в матеріалі 88...92 %. Двокомпонентне рідкокерамічне покриття «ZingaMetall CeramCoat CN1-N» утворює щільний еластичний шар, забезпечуючи захист металу в агресивному середовищі та воді. Це покриття нанесено в три шари. Кожен шар контролювався спеціалізованим товщиноміром.

В результаті обстеження технічного стану та ремонту днища резервуару РВС-200 та враховуючи результати обстеження резервуару в 2016 р., зроблено висновки, що всі елементи резервуару (фундамент, стінка, днище та покрівля зовнішнього і внутрішнього резервуарів) мають задовільний технічний стан, незначні відступи від вимог проекту та чинних норм не впливають на його працездатність.

Ю.М. Посипайко