

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б.Е. ПАТОН

Ученые ИЭС им. Е.О. Патона
к.ф.-м.н. **О.И. Бойчук**,
к.т.н. **Е.А. Давыдов**, к.ф.-м.н. **А.Т. Зельниченко**,
д.т.н. **Л.М. Лобанов**,
д.т.н. **А.Я. Недосека** (зам. гл. ред.),
Ю.Н. Посыпайко,
д.т.н. **В.А. Троицкий** (зам. гл. ред.),
к.т.н. **Е.В. Шаповалов**

Ученые институтов и университетов Украины
д.т.н. **В.А. Стрижало**

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

к.х.н. **М.Л. Казакевич**

Ин-т физической химии, Киев, Украина

д.т.н. **О.М. Карпаш**

Ив.-Франк. НТУ нефти и газа, Украина

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

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

д.т.н. **Г.И. Прокопенко**

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

д.т.н. **В.А. Стороженко**

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

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

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев

д.т.н. **М.Г. Чаусов**

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

Зарубежные ученые

д.т.н. **Н.П. Алешин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ

д.т.н. **В.Л. Венгринович**

Ин-т прикл. физики, Минск, Республика Беларусь

д.т.н. **В.В. Ключев**

ЗАО НИИИИН МНПО «Спектр», Москва, РФ

Адрес редакции

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

ул.Казимира Малевича, 11

г. Киев, 03150, Украина

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

К.Г. Григоренко, Т.В. Юштина

Электронная верстка

Л.Н. Герасименко, Д.И. Серета

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

ISSN 0235-3474

Doi.org/10.15407/tdnk

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

СОДЕРЖАНИЕ

Созданные в ИЭС им. Е.О. Патона технологии на основе акустической эмиссии, обеспечивающие безопасность эксплуатации сварных конструкций 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Киричок В.В., Тороп В.М. Моделирование кольцевой трещины патрубковой зоны плоского днища толстостенного сосуда давления..... 8

Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Герерб Я., Овсиенко М.А., Кушниренко С.А., Иващенко А.П. Технология оценки достоверности регистрации акустико-эмиссионной информации при диагностировании конструкций и сооружений..... 13

Рыбачук В.Г., Учанин В.Н. Новый подход к построению многоэлементных параметрических вихретоковых преобразователей для одноканальных дефектоскопов..... 19

Скальский В.Р., Мокрый О.М., Великий П.П., Долишний П.М., Толопка Я.Д. Новая методика определения скорости поверхностных акустических волн..... 25

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Баглай А.В., Гузеев А.Н., Кипин М.М., Филиппов С.В. Комплекс автоматической вибрационной диагностики оборудования прокатного стана 30

Глуховский В.Ю., Бондаренко О.Г. Особенности диагностики технического состояния промышленных дымовых труб пассивным тепловизионным методом..... 36

Алексенко В.Л., Шарко А.А., Сметанкин С.А., Степанчиков Д.М., Юренин К.Ю. Применение акустико-эмиссионных и тензометрических измерений к процессам диагностики деформационного упрочнения композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы 46

Хворостяный В.В., Родичев Ю.М., Сорока Е.Б. Оценка твердости и локальной повреждаемости керамики и стекла методом царапания до скалывания кромки 55

ИНФОРМАЦИЯ

Конференция «Неразрушающий контроль-2019»: взгляд в будущее 61

Неразрушающий контроль на шестой Международной конференции «Механика разрушения материалов и целостность конструкций» 63

72-а ежегодная Ассамблея Международного института сварки..... 66

Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»..... 68

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА і НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA і NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Виходить 4 рази на рік

Quarterly issue

Головний редактор Б.Є. Патон

Editor-in-Chief B.E. Paton

ЗМІСТ

Створені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона технології на основі акустичної емісії, що забезпечують безпеку експлуатації зварних конструкцій..... 3

Developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute technologies based on acoustic emission, ensuring safe operation of welded structures.....3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

SCIENTIFIC-TECHNICAL

Киричок В.В., Тороп В.М. Моделювання кільцевої тріщини патрубкової зони плоского днища товстостінної посудини тиску 8

Kirichok V.V., Torop V.M. Modeling a circumferential crack in pipe area of a flat bottom of thick-walled pressure vessel..... 8

Недосєка А.Я., Недосєка С.А., Яременко М.А., Гереб Я., Овсієнко М.А., Кушніренко С.О., Іващенко А.П. Технологія оцінки достовірності реєстрації акустико-емісійної інформації при діагностуванні конструкцій та споруд..... 13

Nedoseka A.Ya., Nedoseka S.A., Yaremenko M.A., Gereb J., Ovsienko M.A., Kushniренко S.O., Ivashchenko A.P. Technology of evaluation of the validity of recording acoustic emission information in diagnostics of structures and constructions 13

Рибачук В.Г., Учанін В.М. Новий підхід щодо побудови багатоелементних параметричних вихрострумів перетворювачів для одноканалних дефектоскопів..... 19

Rybachuk V.G., Uchanin V.M. New approach to designing multielement parametric eddy current transducers for single-channel flaw detectors 19

Скальський В.Р., Мокрий О.М., Великий П.П., Долішній П.М., Толопко Я.Д. Нова методика визначення швидкості поверхневих акустичних хвиль..... 25

Skalskyi V.R., Mokryi O.M., Velyki P.P., Dolishnyi P.M., Tolopko J.D. New procedure for determination of surface acoustic wave velocity..... 25

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

INDUSTRIAL

Баглай А.В., Гузєєв А.Н., Кіпін М.М., Філіппов С.В. Комплекс автоматичної вібраційної діагностики обладнання прокатного стану 30

Baglay A.V., Guzeev A.N., Kipin M.M., Filippov S.V. Complex for automatic vibrational diagnostics of rolling mill equipment 30

Глуховський В.Ю., Бондаренко О.Г. Особливості діагностування технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом 36

Glukhovskiy V.Yu., Bondarenko O.G. Features of diagnostics of technical condition of industrial flue pipes by passive thermal imaging method 36

Алексєнко В.Л., Шарко А.А., Сметанкін С.А., Степанчиков Д.М., Юренін К.Ю. Застосування акустико-емісійних та тензометричних вимірів до процесів діагностики деформаційного зміцнення композиційних матеріалів на основі епоксидної матриці 46

Aleksenko V.L., Sharko A.A., Smetankin S.A., Stepanchikov D.M., Yurenin K.Yu. Application of acoustic emission and strain gauge measurements to processes of diagnostics of strain hardening of epoxy matrix composites 46

Хворостяний В.В., Родічев Ю.М., Сорока О.Б. Оцінка твердості та локальної пошкоджуваності кераміки та скла методом дряпання до відколювання кромки 55

Khvorostyaniy V.V., Rodichev Y.M., Soroka O.B. Assessment of hardness and local damage of ceramics and glass by the method of scraping up to chipping out 55

ІНФОРМАЦІЯ

INFORMATION

Конференція «Неруйнівний контроль-2019»: погляд в майбутнє..... 61

Conference «Non-destructive Control-2019»: a Look into the Future..... 61

Неруйнівний контроль на шостій Міжнародній конференції «Механіка руйнування матеріалів та цілісність конструкцій» 63

Non-destructive testing at the 6th International Conference «Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity»..... 63

72-а щорічна Асамблея Міжнародного інституту зварювання 66

72nd IIW Annual Assembly 66

Міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів» 68

International conference «Beam Technologies in Welding and Material Processing»..... 68

Адреса редакції

Address

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

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

СОЗДАННЫЕ В ИЭС им. Е.О. ПАТОНА ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Отдел технической диагностики сварных конструкций создан в 1983 г. на базе лаборатории того же наименования, работающей в этом направлении с 1963 г. Отдел является структурным подразделением Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (рис. 1).

С 1993 г. на базе отдела по направлению техническая диагностика работает Технический комитет стандартизации Украины № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (ТК 78), созданный НАН Украины, Госстандартом и Комитетом по охране труда Украины (Приказ № 60/106 от 3 мая 1993 г.). С участием отдела издается международный научно-технический и производственный журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (четыре номера в год). Заведующий отделом А.Я. Недосека является заместителем главного редактора журнала.

После рассмотрения работ отдела в 2017 г. на координационном совете программы «Горизонт 2020» отдел был включен в состав исполнителей по теме 3.1b. (Aero UA feasibility study work plan proposal for pilot project). Грант № 724034.

Отдел проводит исследования и разработки по проблеме «Техническая диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных соединений, материалов, покрытий и конструкций в процессе их эксплуатации на основе акустической эмиссии».

Цель – разработка теории, методов и средств обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений.

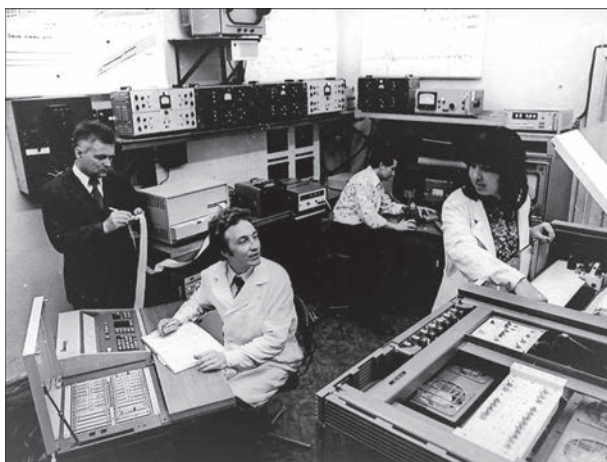


Рис. 1. Лаборатория технической диагностики в 1979 г.

Указанная проблема включает разработки по следующим направлениям:

1. Теоретические и экспериментальные исследования явлений, сопутствующих деформированию и разрушению материалов и сварных соединений в результате быстрых местных изменений их структуры в процессе разрушения, зарождения и развития трещин и других дефектов. Разработка теории квантовой механики разрушения.

2. Разработки по п. 1 проводятся методами статистической механики, математического моделирования, теории и методов прогнозирования, теории принятия решений о состоянии материалов конструкций.

3. Исследования и разработки по пп. 1, 2 позволили построить диагностические мониторинговые и экспертные системы и приборы, а также методы их применения (за рубежом Structural Health Monitoring – SHM технология).

4. Внедрение указанных разработок в заинтересованных ведомствах и, в первую очередь, на:

- трубопроводном транспорте;
- энергетических установках;
- предприятиях химического и нефтеперерабатывающего профиля;
- предприятиях металлургического профиля;
- элементах узлов, сварных соединениях, материалах с покрытиями и без них, в конструкциях машиностроения.

На основе проведенных работ получены следующие результаты.

В области теории:

- получены основные аналитические зависимости для кванта излучения, возникающего при зарождении и развитии дефектов в материалах при их деформировании. Получены формулы, описывающие излучения, возникающие при образовании и развитии повреждений в материалах, что позволило более глубоко проанализировать процессы деформирования материалов и скорректировать программное обеспечение диагностической системы, а также повысить точность и информативность данных испытаний. Аналитически показано, что акустико-эмиссионные (АЭ) волны распространяются в материалах конструкций со скоростями, значительно превышающими

ми базовую скорость продольной волны C_1 (C_2 – скорость поперечной волны), см. рис. 2;

- разработан и введен в практику расчетов вектор состояния материалов (ВСМ), позволяющий статистическим путем анализировать этапы разрушения материалов при их деформировании и поэтапно предсказывать ход процесса разрушения. На основе исследований ВСМ готовятся методические материалы для диагностики состояния промышленных конструкций. Разработанная на основе ВСМ технология позволяет, не прерывая эксплуатацию конструкции, определять разрушающую нагрузку, предел длительной прочности материалов независимо от количества часов наработки, определять остаточный ресурс материала с вероятностью 0,95 и погрешностью $\pm 15\%$. По указанным показателям метод аттестован УкрЦСМ (ГП «Укрметртестстандарт»). Созданы и утверждены УкрЦСМ методики поверки показателей погрешности оценок;
- предложено и введено в практику в виде действующих программ и алгоритмов понятие «Нормированный интеллектуальный совет» (НИС). Его использование позволяет автоматизировать принятие решения о мерах, которые необходимо предпринять при возникновении

опасных ситуаций разных типов при эксплуатации конструкций. НИС формируется на основе данных реального времени о состоянии конструкции и опыте ее предшествующей эксплуатации, что позволяет перейти от простого мониторинга конструкции к управлению эксплуатационными параметрами. Программы, использующие НИС, установлены на Одесском припортовом заводе и обеспечивают рекомендации персоналу цеха перегрузки аммиака. На рис. 3 показан базовый прибор ЕМА-4, являющийся основой диагностических комплексов и его применение в системе контроля аммиакопровода над каналом с питьевой водой в районе села Апостолово (рис. 4).

В области экспериментальных работ:

- в дополнение к исследованиям, проводимым непосредственно в отделе, созданы и функционируют на ряде предприятий Украины удаленные испытательные центры на базе систем непрерывного мониторинга конструкций. Обратная связь и управление этими центрами установлена из центра, находящегося в ИЭС. Системы по линиям связи через интернет передают информацию о состоянии контролируемых конструкций в ИЭС (отдел № 59). Таким образом, исследования

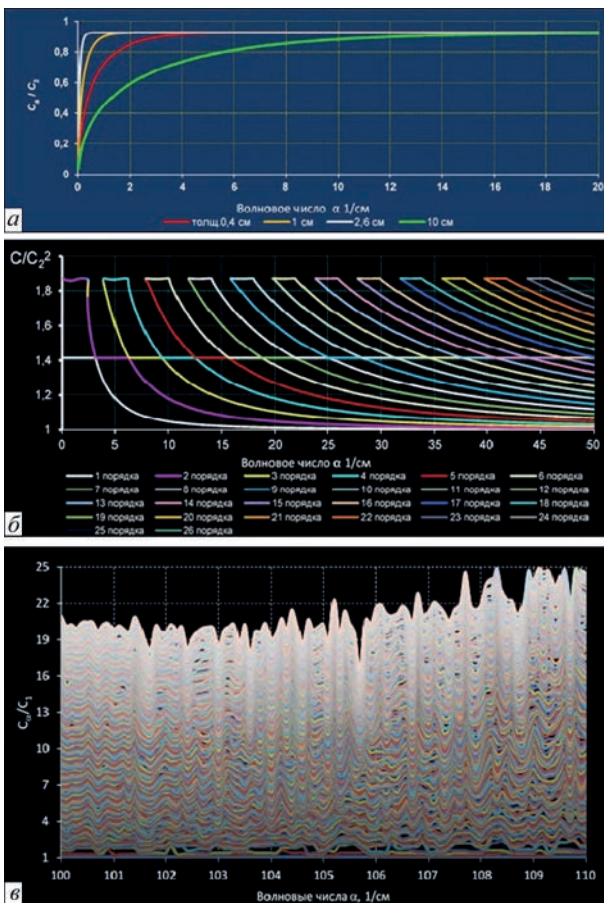


Рис. 2. Диаграмма спектров распространения АЭ волн для трех диапазонов скоростей: а – ниже C_2 ; б – выше C_2 , но ниже C_1 ; в – выше C_1



Рис. 3. Приборы ЕМА-4 (4-х и 16-ти каналные)



Рис. 4. АЭ- и тензоконтроль аммиакопровода у села Апостолово с передачей информации в центральный диагностический центр в г. Киеве

развития разрушения материалов эксплуатирующихся конструкций проводятся отделом на базе практических оценок их работоспособности в реальных условиях. Методика контроля позволяет вмешиваться в процесс испытаний, корректировать и обновлять прогнозные программы из единого удаленного центра. Такие исследования и основанные на их результатах системы непрерывного мониторинга осуществлены впервые в мировой практике. Системы указанного типа установлены на Одесском припортовом заводе (семь систем), Киевских ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6 (две системы, работающие при температуре 450 и 560 °С), на конструкциях предприятия Укрхимтрансаммиак – мостовом километровом переходе через реку Днепр (одна система) и через дорогу и водоканал в районе Кривого Рога (одна система);

- результаты, получаемые при реальной эксплуатации конструкций, позволяют более глубоко исследовать процессы разрушения и принимать необходимые меры по корректированию и совершенствованию теории и методик диагностического контроля.

В области создания методических материалов:

- разработаны 37 нормативных материалов и методик диагностирования, которые в зависимости от выполняемых работ и вида необходимого контроля передаются производству. Это методики по АЭ диагностике работоспособности трубопроводных систем и сосудов нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств, работающих под давлением как при нормальных, так и при низких (до минус 30 °С) и высоких (до 560 °С) температурах;
- совместно с АО «Видеотон» (Венгрия) разработана мобильная передвижная система технической диагностики ЕМА. Аппаратура ЕМА моделей 2, 3 и 4 запущена в производство;
- разработана методика комплексной метрологической аттестации системы АЭ диагностики, что позволило провести сертификацию оборудования. Метрологические характеристики аппаратуры устанавливаются по следующим блокам параметров:
 - электронная часть аппаратуры;
 - измерительные датчики;
 - блок измерения координат АЭ событий;
 - блок прогнозирования разрушающих нагрузок.

В области практического освоения результатов разработок:

- разработана технология дистанционного непрерывного мониторинга состояния конструкций в процессе их эксплуатации. Создан центр управления контролем, позволяющий оценивать прочность материала конструкций, находящихся на любом расстоянии от центра.

Смонтированы и запущены в эксплуатацию 11 таких систем для мониторинга промышленных конструкций повышенной опасности;

- проведены индивидуальные испытания более 1000 узлов сосудов, работающих под давлением.

В области подготовки и переподготовки специалистов по АЭ диагностике:

- в соответствии с решением ТК 78 создан аттестационный центр по подготовке и переподготовке специалистов в области АЭ диагностики (рис. 5). С момента создания центра и по настоящее время обучение прошли более 2000 специалистов из различных промышленных предприятий Украины, России, Словении. Также в соответствии с решением ТК 78 созданы и работают постоянно действующие курсы по подготовке и переподготовке специалистов первого, второго и третьего уровней в области технической диагностики;
- разработаны программы переподготовки и созданы на их основе соответствующие методические материалы;
- в 2008 г. вышло 4-е издание учебного пособия по курсу «Основы расчета и диагностики сварных конструкций» под редакцией академика Б.Е. Патона, а в 2012 г. вышел методический альбом «Акустическая эмиссия и ресурс конструкций». Учебное пособие в виде монографии издано в Англии в 2012 г. издательством «Cambridge International Science Publishing Limited». В связи с появлением большого объема новых исследований и разработок в области АЭ диагностики подготовлено 5-е издание учебного пособия.

За последние годы отделом выполнены и отражены в публикациях и отчетах следующие работы:

1. Аналитически показано, что в твердых телах распространяются волны со скоростями выше $C_1 \approx 0,5$ см/мкс для сталей. Поэтому скорости C_1 , C_2 и C_3 (скорость волны Рэлея) могут быть приняты в расчетах за базовые физические постоянные. Скорости выше C_1 опытным путем не зафиксированы в связи с тем, что существующие АЭ датчи-



Рис. 5. Подготовка специалистов по технической диагностике

ки строятся, в основном, на пьезокерамических преобразователях, которые, имея четкую амплитудно-частотную характеристику, не фиксируют волны, распространяющиеся с высокими скоростями (рис. 2).

2. Показано, что путем прозвучивания материалов с дефектами с помощью АЭ аппаратуры можно получить характеристики, четко связанные с появившимися в материале дефектами.

3. Аналитически исследована спектральная картина волновых процессов, формирующихся в пластинах при возникновении повреждений. Разработаны специальные методики и программы для выбора в общем волновом поле пластин требуемых рабочих частот и параметров АЭ преобразователей.

4. Аналитически и экспериментально изучено влияние локального скопления дефектов в пластинах на распространение АЭ волн.

5. Исследования, проведенные с помощью АЭ, показали, что дефекты формируются на микроуровне в виде перемещения дислокаций. Далее они развиваются, увеличивая размеры, вплоть до разрушения. Эти стадии хорошо улавливает аппаратура на основе акустической эмиссии, что позволило построить математическую модель развития дефектов в материалах и создать методику оценки состояния материала по данным АЭ.

6. Специально разработанная методика позволила создать систему непрерывного мониторинга конструкций, эксплуатирующихся при высоких температурах. Системы на основе АЭ технологии,

внедренные на киевских ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6, позволяют при действующих в процессе эксплуатации нагрузках прогнозировать разрушающую нагрузку и остаточный ресурс материала.

7. Исследован аналитически и подтвержден экспериментальным путем механизм возникновения продольных трещин в трубопроводах, работающих при высоких температурах.

8. Проведен анализ и показано, что современное состояние физических методов анализа и уровень развития вычислительной техники позволяют создавать методики и математическое обеспечение, решающие сложные задачи в оценке состояния конструкций. Развитие интеллектуальных технологий в контроле состояния конструкций привело к созданию «умных» методов контроля и контролирующего оборудования.

9. Проведены аналитические и экспериментальные исследования распространения АЭ волн в сварных соединениях из разнородных материалов с близкими физическими свойствами. Показано, что наличие разнородности материалов в соединении влияет на распространение АЭ волны, разнородность приводит только к изменению амплитуды сигналов. Последнее свойство было использовано при испытании трубопровода в печи риформинга Одесского припортового завода.

10. Проведены сравнительные испытания различных методов контроля дефектов при испытаниях, проведенных в мае 2016 г. на базе компании PEVE COOP Ltd г. Хайдусобосло (Венгрия) специ-

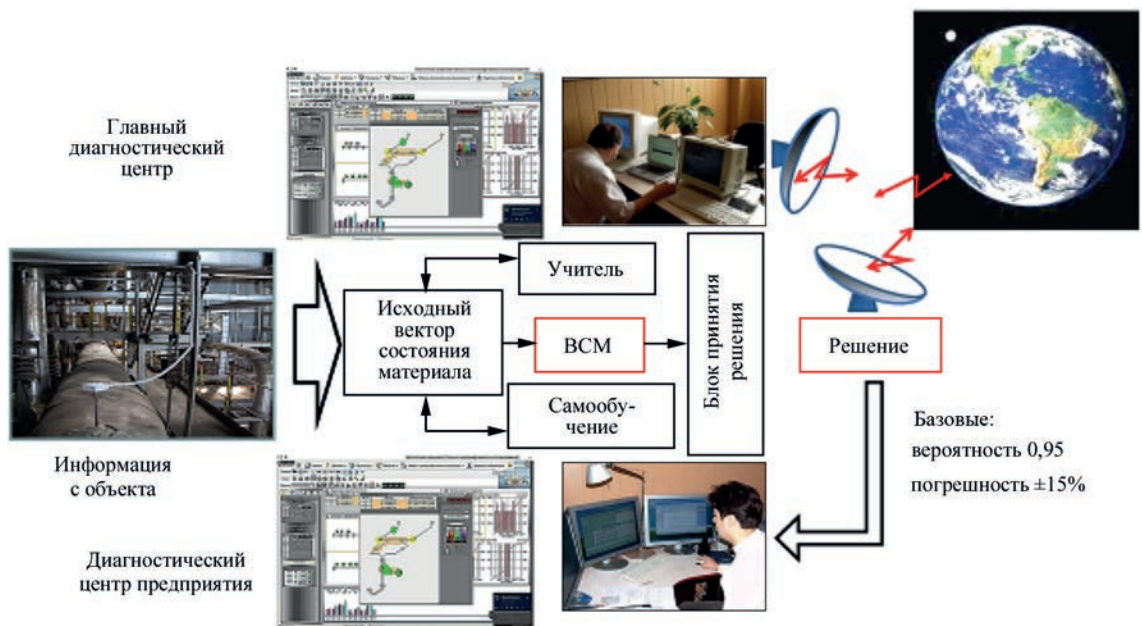


Рис. 6. Схема обработки информации, поступающей с объекта контроля последовательно (на рисунке слева направо) в аналитический блок, где происходит первый этап обработки информации и при достижении заданных показателей по вероятности и ошибке прогноза решение, как предварительное, поступает в блок принятия окончательного решения. Далее результаты решения поступают в диспетчерский пункт предприятия и по линии интернет связи в главный диагностический центр, который может быть расположен на любом расстоянии от местонахождения контролируемой конструкции. Главный диагностический центр учитывает эту и другую информацию при принятии окончательного решения о мероприятиях, которые необходимо выполнить по контролируемой конструкции

алистами в области неразрушающего контроля из Австрии, Венгрии, Германии и Украины. Испытанию внутренним давлением подвергались сосуды для хранения пропан-бутана объемом 5 м³, длиной 4,335 м, диаметром 1,25 м и толщиной стенки 6 мм, выполненные из стали St 52-3. При проведении испытаний была проверена методика ИЭС по прогнозированию разрушающей нагрузки. Испытания показали, что разрушающая нагрузка была спрогнозирована с погрешностью, не превышающей 5 %.

Работы по пп. 1–10 отражены в следующих публикациях: Недосека А.Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром; Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение*. Киев, Индпром; Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технологии и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 2, 3–18; Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном контроле трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 3, 7–14; Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 2, 3–9; Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Техн. диагност. и неразруш.*

контроль, 1, 9–16; Недосека А.Я., Недосека С.А. (2014) Особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 2, 3–11; Недосека А.Я., Недосека С.А., Овсиенко М.А. и др. (2016) Испытание сосудов давления международной группой специалистов. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 3, 3–10.

Последующие работы предполагают:

1. Обеспечить постепенный переход от непрерывного АЭ мониторинга к управлению эксплуатацией конструкций по их фактическому состоянию.

2. С целью расширения географии применения разработок отдела и совершенствования технологии оценок состояния конструкции продолжить исследования и разработки в направлении изучения и совершенствования обработки информации, поступающей с мониторинговых систем, установленных в любой точке земного шара (рис. 6).

3. Большое значение приобретает работы по оценке энергии разрушения материалов, которую можно оценивать методом АЭ. Это дает возможность существенно повысить точность прогнозирования разрушающих нагрузок. Поэтому этому вопросу предполагается уделить повышенное внимание.

4. Проведение исследований и разработок в направлении расширения применения методик и технологии АЭ контроля для конструкций:

- сложной геометрической формы;
- работающих при температурах до 1000 °С;
- изготовленных из композитных материалов.

А.Я. Недосека

9-а Національна науково-технічна конференція і виставка

Неруйнівний контроль та технічна діагностика

Україна, Київ, 19-21 листопада 2019

ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України
Міжнародний виставковий центр

 Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона
Національної академії наук України

 Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

 Міжнародний виставковий центр

 Міжнародний комітет з неруйнівного контролю

 Європейська федерація з неруйнівного контролю

Основні теми конференції:

- нові методи і технології неруйнівного контролю;
- моніторинг технічного стану і продовження експлуатаційного ресурсу об'єктів енергетики, нафто- і газопроводів;
- підвищення енергоефективності будівель та споруд;
- проблемні питання неруйнівного контролю в транспортній галузі;
- неруйнівний контроль дорожньої інфраструктури;
- стандартизація, підготовка і сертифікація персоналу;
- демонстрація сучасного обладнання для НКТД виробниками і постачальниками

Важливі дати:

Заявка на участь до 20.10.2019 р.

Оплата за участь до 31.11.2019 р.



Українське товариство неруйнівного контролю і технічної діагностики

Адреса і телефони Оргкомітету:

Адреса для листів: 03150, м. Київ-150, а/с 187, УТ НКТД

Тел.: (+380 44) 200-46-66, 205-22-49, 200-81-40, 205-21-96

e-mail: usndt@ukr.net

інтернет: www.usndt.com.ua

МОДЕЛЮВАННЯ КІЛЬЦЕВОЇ ТРІЩИНИ ПАТРУБКОВОЇ ЗОНИ ПЛОСКОГО ДНИЩА ТОВСТОСТІННОЇ ПОСУДИНИ ТИСКУ

В.В. Киричок, В.М. Тороп

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

Розглянуто патрубкову зону плоского днища товстостінної посудини тиску. Проведено розрахунок поля залишкових зварювальних напружень методом скінченних елементів з урахуванням багатьох зварювальних проходів. З метою дослідження процесу руйнування багатопрхідного зварного шва при експлуатації, приводиться апроксимаційний спосіб переносу тензорів напружень, деформацій та переміщень залишкового стану у виді початкових граничних умов на нову скінченно-елементну сітку з імітацією тріщини. В роботі проведено аналіз зміни безпечності конструкції з ростом глибини тріщини. Бібліогр. 4, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: залишкові напруження, мapping полів, термічний цикл зварювання, тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень

Тріщини в патрубкових зонах посудин тиску є досить поширеним явищем. Найчастіше такі пошкодження виникають по кільцю біля зони сплавлення основного металу зі зварним швом. Це може бути обумовлено наявністю концентратора напружень в зоні переходу, низького опору до корозії, структурних перетворень, водневого розтріскування та т. п. Виникнення таких тріщин та їх зріст важко прогнозувати, оскільки в патрубкових зонах наявні залишкові напруження, що обумовлені термічним циклом зварювання та нерівномірним пластичним деформуванням. В разі виявлення подібних дефектів під час експлуатації, необхідно правильно оцінювати ситуацію доцільності негайного ремонту чи заміни. Завдання ще ускладнюється тим, що рівень залишкових напружень по всій товщині металу неможливо точно визначити існуючими на даний час методами неруйнівного контролю. Для цих завдань найчастіше застосовують скінченно-елементне моделювання. Звичайно, враховуючи різний склад присадного дроту та основного металу, ефекти змішування розплавленого металу, міграцію хімічних елементів при зварюванні, структурні перетворення, відсутність точних даних за фізичними властивостям і т. п., скінченно-елементним моделювання не можна досягти ідеальної точності. Та все ж таки, цей неруйнівний підхід зі всіх існуючих є найбільш точним, деяким дослідникам навіть вдавалося отримати цим способом дуже близькі результати до результатів, отриманих засобами руйнівного контролю. Головним недоліком скінченно-елементного моделювання є необхідність тривалого часу на розрахунки та великих обчислювальних потужностей.

Розрахункова модель процесу зварювання. Для розрахунку залишкових напружень, деформа-

цій та переміщень конструкції використовувалася метод скінченних елементів. Об'єктом дослідження є патрубкова зона товстостінної посудини тиску. Товщина основи посудини 40 мм, труба штуцера 160×30 мм. Перед приваркою виконується розробка кромки патрубка. Згідно з роботою [1] застосовується тип шва У24. Заповнення шва проводиться за 16 проходів. Щоб зменшити час розрахунку, до розгляду брали лише локальну частину обладнання, на яку зварювальні напруження та температура мають помітний вплив.

Високі температури при зварюванні дуже сильно впливають на механічні та фізичні властивості сталі, що необхідно враховувати при моделюванні. При розрахунках механічні та фізичні властивості визначалися по емпіричних залежностях програмного пакету JMatPro відносно хімічного складу сталі 20 (хімічний склад вибирався за середніми показниками марочника сталей [2]) і межі текучості при кімнатній температурі, згідно з роботою [3]. Прийняті фізичні та механічні властивості наведені в таблиці. Оскільки при моделюванні дуже важко передбачити перемішування основного металу з присадним, і знаючи, що присадний дріт, як правило, близький за складом до основного металу, ми для спрощення вважаємо, що склад основного металу та присадного дроту аналогічні.

Вирішувалася зв'язана тепломеханічна задача. Моделювання термомеханічного циклу зварювання імітувалося шляхом прикладення температурних граничних умов (температура плавлення сталі 20) до вузлів, що належать зварювальній ванні. Таким чином, для моделювання процесу до уваги бралися швидкість зварювання та розміри зварювальної ванни. Швидкість пальника – 20 м/год. Форма ванни постулювалася напівеліпсоїдною з довжиною 30 мм, шириною 16 мм і глибиною 8 мм. Форма перерізу шва кожного проходу спро-

Прийняті для розрахунку фізичні та механічні властивості сталі 20

Температура, °С	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Коефіцієнт термічного розширення, К ⁻¹	Залежність межі текучості від попереднього пластичного деформування	
						Напруження, МПа	Деформація
0	2,1·10 ¹¹	0,29	452	51	1,25·10 ⁻⁵	318	0
						439	0,02
						484	0,04
						512	0,06
						533	0,08
						550	0,1
350	1,93·10 ¹¹	0,3	580	43	1,34·10 ⁻⁵	605	0,2
						190	0
						267	0,02
						315	0,06
500	1,71·10 ¹¹	0,3	685	38	1,4·10 ⁻⁵	340	0,1
						377	0,2
						173	0
						247	0,02
900	1,16·10 ¹¹	0,34	610	27	1,22·10 ⁻⁵	290	0,06
						312	0,1
						346	0,2
						49	0
1400	0,65·10 ¹¹	0,37	696	33	1,69·10 ⁻⁵	66	0,02
1500	0,36·10 ¹⁰	0,45	900	34	2,45·10 ⁻⁵	66	0,2
						-	

щено приймалася трикутною. На початку всі елементи моделі швів деактивуються, і потім перед кожним проходом реактивуються елементи наступного проходу. Кожен наступний прохід імітувався після повного охолодження деталі. На рис. 1 можна бачити проміжні результати розрахунків радіальних напружень в середньому перерізі деталі по шву після 1-го, 4-го, 10-го, 16-го проходів.

За отриманими результатами можна відмітити деякі тенденції розподілу та перерозподілу напружень. Максимальні напруження концентруються на основі днища поряд з переходом до шва. Як показує досвід діагностики, саме в цій області найчастіше з'являються тріщини. В процесі накладання невеликої кількості нових швів можна побачити тенденцію, що напруження в нижніх шовних шарах зменшуються або навіть стають стискальними. Проте, якщо швів дуже багато, то розподіл напружень в наплавленому металі та навколошовній зоні стає нерівномірним і цей ефект в багатьох місцях нівелюється.

Алгоритм переносу результатів розрахунку механічної задачі на нову сітку з тріщиною. Моделюючи тріщину, необхідно створити таку сітку навколо її фронту, щоб максимально точно порахувати в цій області розподіл напружень. Якщо цю сітку створити перед імітацією процесу зварювання, то це викличе ряд незручностей. По-перше, згущення розміру скінченних елементів в зоні дефекту сприятиме великому розміру

задачі та збільшенню часу розрахунку. По-друге, розміри та орієнтація скінченних елементів біля тріщини часто стає причиною проблем з пошуком збігу при рішенні пружно-пластичної задачі. По-третє, відсутність можливості зміни параметрів тріщини після розв'язання тепломеханічної задачі. Якщо ми хочемо змінити параметри тріщини, всі розрахунки доведеться робити повторно, що затратно по часу та ресурсам комп'ютера. В такому випадку пропонується перейти до переносу параметрів порахованої моделі на нову сітку (маппінг полів). В нашому розпорядженні є координати вузлів сітки з тріщиною та типи елементів, а також тензори напружень, тензори пластичних деформацій, переміщення у вузлах і координати вузлів сітки першої моделі. Аналізуючи розрахунок першої моделі, можна з невеликою похибкою відмітити, що напруження, деформації та переміщення між двома сусідніми вузлами, не включаючи вузли, змінюються лінійно. При такому припущенні тензори напружень σ в деякій точці з довільними координатами (X, Y, Z) , яка належить області тетраедра чи області поблизу з ним, із відомими координатами та значеннями тензорів в цих координатах, можуть бути пораховані по формулі:

$$\sigma = AX + BY + CZ + D, \quad (1)$$

де A, B, C, D – деякі коефіцієнти.

Якщо нам відомі рішення в чотирьох вузлах тетраедра, то ми можемо визначити коефіцієнти $A, B,$

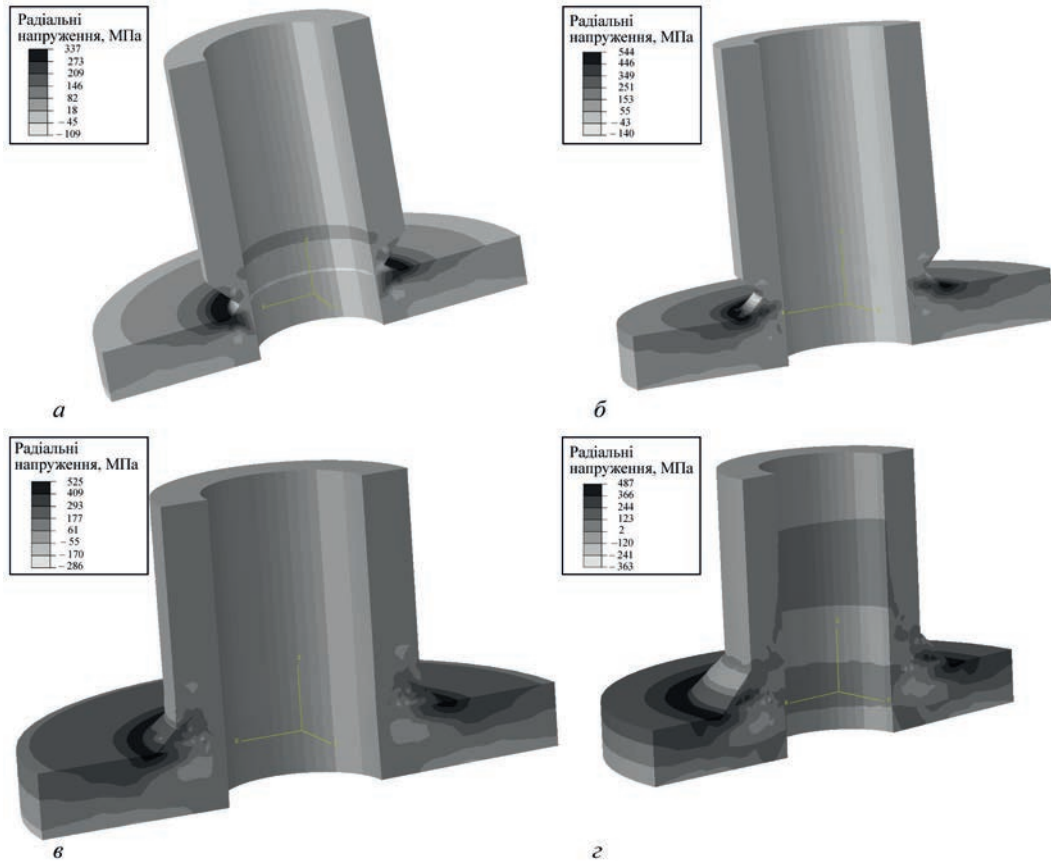


Рис. 1. Радіальні напруження в шві та навколошовній зоні приварки патрубку до основи: *а* – після 1-го проходу, *б* – 4-го, *в* – 10-го, *z* – 16-го

C, D з системи рівнянь, підставивши значення координат та параметрів в цих вузлах до формули (1).

Таким чином, щоб знайти напруження у вузлі нової сітки з координатами (X_0, Y_0, Z_0) , треба знайти найближчі чотири вузла старої сітки $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3), (X_4, Y_4, Z_4)$, що не належать одній площині, і жодні три з яких не лежать на одній прямій. Потім, по даних старої сітки знаходимо коефіцієнти A, B, C, D з системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= AX_1 + BY_1 + CZ_1 + D \\ \sigma_2 &= AX_2 + BY_2 + CZ_2 + D \\ \sigma_3 &= AX_3 + BY_3 + CZ_3 + D \\ \sigma_4 &= AX_4 + BY_4 + CZ_4 + D, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – відомі тензори напружень в чотирьох вузлах старої сітки, відповідно.

Визначивши коефіцієнти A, B, C, D , можна визначати напруження в точці нової моделі (X_0, Y_0, Z_0) за формулою (1). Аналогічно можна знайти для точки нової сітки тензори деформацій та переміщення. Варто відмітити, що більшості програм скінченно-елементного моделювання початкові граничні умови у виді напружень та деформацій прикладаються не до вузла, а до центру мас скінченного елемента і потім значення у вузлах знаходяться апроксимацією. В такому разі, за точку нової сітки для напружень і деформацій треба брати не координати вузлів сітки, а координати центрів елементів.

Результати моделювання кільцевої тріщини.

Тріщина постулювалася по колу в місці переходу від зварного шва. Щоб зрозуміти характер можливого підростання тріщини, проводилося декілька розрахунків з різними глибинами дефекту. За параметр навантаженості об'єкту з тріщиною взято коефіцієнт інтенсивності напружень, який в розрахунковій моделі визначався методом контурних інтегралів [4]. На кроці розрахунку появи тріщини властивості металу консервативно приймалися ідеально пружними. Таким чином ми не враховуємо збільшення тріщиностійкості через збільшення радіусу вершини тріщини. На рис. 2 можна побачити розподіл зварювальних залишкових радіальних напружень в тілі з тріщиною.

Як було видно з рис. 1, z , напруження концентруються в верхній частині основи біля шва і зменшуються по глибині. В нижній частині вони



Рис. 2. Залишкові радіальні напруження в тілі з тріщиною навколупатрубкової зони (глибина тріщини 25 мм)

навіть подекуди являються стискальними. Однак хибно вважати, що тріщина зупиниться, якщо до росте до стисненої зони. Справа в тім, що коли дефект підростає, напруження перерозподіляються і вершина тріщини постійно знаходиться в зоні розтягу. Однак проаналізувавши коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) в околі тріщини з різними її глибинами (рис. 3), можна бачити, що він, починаючи з деякої глибини, зменшується зі збільшенням глибини тріщини. Цей ефект можна пояснити тим, що залишкові зварювальні напруження є самоврівноваженими, і при руйнуванні зв'язків в металі значна частина енергії розтягу вивільняється. З іншого боку, поява тріщини не дуже впливає на деформації, викликані згинальними моментами, по фронту тріщини, проте глибина дефекту прямо пропорційно впливає на зменшення моменту опору залишкового перерізу. Тому з ростом глибини тріщини рівень місцевих згинальних напружень в зоні патрубку зменшується, що також сприяє зменшенню КІН.

Для оцінки поведінки конструкції при експлуатації було пораховано коефіцієнти інтенсивності напружень від експлуатаційних навантажень. Якщо в посудині внутрішній тиск становить 1 МПа, то залежність КІН від глибини тріщини без врахування залишкових напружень показана на рис. 4. Тобто, ймовірність підростання тріщини спочатку збільшується, і після деякого значення починає спадати. Зменшення КІН можна пояснити зменшенням рівня місцевих згинальних напружень внаслідок зменшення жорсткості конструкції при підростанні дефекту.

Заключним етапом моделювання можливого руйнування конструкції було визначення навантаження, яке призводить до пластичного колапсу конструкції – умовний стан, при якому пластичні деформації відбуваються постійно при незмінному мінімальному навантаженні. Аналіз ґрунтується на ітеративній процедурі Ньютона–Рафсона та нелінійних пружнопластичних властивостях матеріалу. З практичної точки зору при скінченно-елементному аналізі навантаження в конст

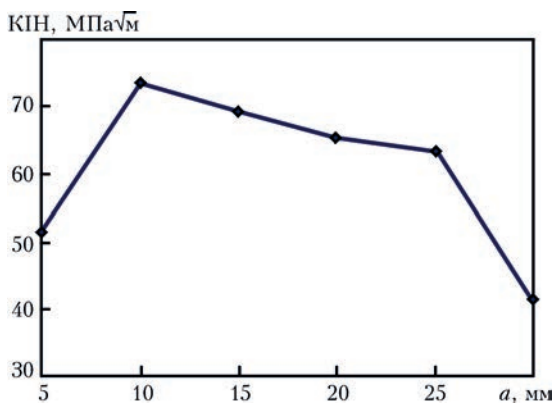


Рис. 3. Залежність КІН від глибини тріщини a , визваного дією залишкових напружень

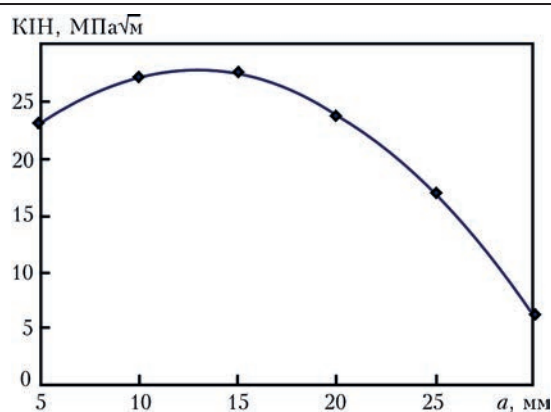


Рис. 4. Залежність КІН від глибини тріщини a , визваного дією внутрішнього тиску 1 МПа

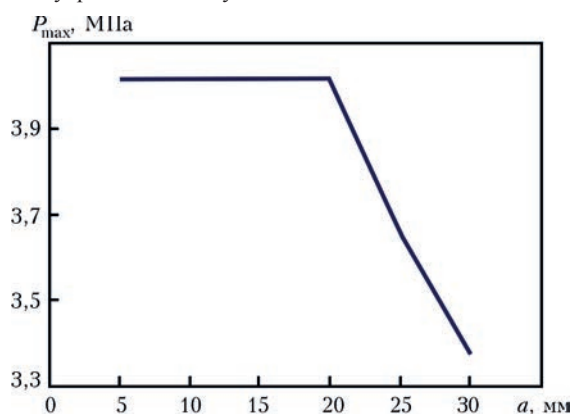


Рис. 5. Залежність тиску пластичного колапсу від глибини кільцевої тріщини

ції плавно збільшуються до того моменту, доки рішення буде збіжним. Навантаження в момент розбіжності є зусиллям пластичного колапсу. На рис. 5 зображено зміну тиску пластичного колапсу від глибини тріщини для патрубкової зони, що розглядається. Як видно з малюку, це зусилля майже не змінюється при малих та середніх розмірах тріщини і плавно починає спадати, коли розмір дефекту стає вдвічі менше товщини основи плоского днища. Це означає, що до певних розмірів тріщини в посудині тиску є більш небезпечні зони, і в'язке руйнування відбувається саме в них. Також варто відмітити ту особливість, що в плоскому днищі радіальні напруження дуже малі і виникають в основному при овалізації плоскої основи від згинальних зусиль.

Висновки

В роботі проведено розрахунок зварювальних напружень приварки патрубка до товстостінного плоского днища зі застосуванням методу скінченних елементів. Розрахунки показали, що найбільш ймовірним чинником зародження та розвитку тріщини навколо штуцера є залишкові зварювальні напруження. Спільно з експлуатаційними навантаженнями залишкові напруження можуть стати причиною підростання тріщини на деяких глибинах, проте схема суцільного миттєвого крихкого

руйнування є малоїмовірною, оскільки з ростом глибини тріщини, напруження самокомпенсуються або ж перерозподіляються та зменшуються. В'язке руйнування патрубкових зон плоских днищ можливе лише при наявності дуже великих дефектів. Найбільш ймовірним чинником росту кільцевих тріщин штуцерів і руйнування плоских днищ варто вважати корозію, а також структурні та хімічні зміни металу, які не описуються класичною механікою руйнування.

Список літератури

1. (1990) РД 26-18-8-89. *Сварные соединения приварки люков, штуцеров и муфт. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.*
2. Сорокин В.Г., Волосникова А.В. (1989) *Марочник сталей и сплавов.* Сорокин В.Г. (ред.). Москва, Машиностроение.

3. Dmytriienko R.I., Prokopchuk S.M., Paliienko. O.L. (2018) Inner Pressure Testing of Full-Scale Pipe Samples. *Non-destructive Testing and Repair of Pipelines.* Springer International Publishing, AG, pp. 417–429.
4. (2011) *Abaqus 6.11. Abaqus/CAE User's Manual.* Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

References

1. (1990) RD 26-18-8-89. *Welded joints of hatches, nozzles and couplings. Main types, structural elements and dimensions [in Russian].*
2. Sorokin, V.G., Volosnikova, A.V. (1989) *Grade guide of steels and alloys.* Ed. by V.G. Sorokin. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Dmytriienko R.I., Prokopchuk S.M., Paliienko. O.L. (2018) Inner pressure testing of full-scale pipe samples. *Non-destructive testing and repair of pipelines.* Springer International Publishing, AG, 417–429.
4. (2011) *Abaqus 6.11. Abaqus/CAE user's manual.* Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОЙ ТРЕЩИНЫ ПАТРУБКОВОЙ ЗОНЫ ПЛОСКОГО ДНИЩА ТОЛСТОСТЕННОГО СОСУДА ДАВЛЕНИЯ

В.В. Киричок, В.М. Тороп

ІЭС ім. Е.О. Патона НАН України. 03150, г. Київ, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрена трубковая зона плоского днища толстостенного сосуда давления. Проведен расчет поля остаточных сварочных напряжений методом конечных элементов с учетом многих сварочных проходов. С целью исследования процесса разрушения многопроходного сварного шва при эксплуатации, приводится аппроксимационный способ переноса тензоров напряжений, деформаций и перемещений остаточного состояния в виде начальных граничных условий на новую конечно-элементную сетку с имитацией трещины. В работе проведен анализ изменения безопасности конструкции с ростом глубины трещины. Библиогр. 4, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: остаточные напряжения, маппинг полей, термический цикл сварки, трещина, коэффициент интенсивности напряжений

MODELING A CIRCUMFERENTIAL CRACK IN PIPE AREA OF A FLAT BOTTOM OF THICK-WALLED PRESSURE VESSEL

V.V. Kirichok, V.M. Torop

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The pipe area of a flat bottom of thick-walled pressure vessel was considered. The field of residual welding stresses was calculated by finite element method, taking into account many welding passes. In order to study the process of fracture of a multipass weld in operation, the approximation method for transferring stress tensors, deformations and displacements of the residual state in the form of initial boundary conditions to a new finite element mesh with crack simulation is presented. Analysis of the change of structure safety with increase of the crack depth was performed in the work. 4 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: residual stresses, field mapping, thermal cycle of welding, crack, stress intensity factor

Надійшла до редакції
11.04.2019

ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.Я. Недосека¹, С.А. Недосека¹, М.А. Яременко¹, Я. Гереб², М.А. Овсиенко¹,
С.А. Кушниренко³, А.П. Иващенко⁴

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

²Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalás u. 28

³Одесский припортовый завод. 65001, г. Одесса, Главпочтамт а/я № 304

⁴ГП «Укрметртестстандарт». 03143, г. Киев, ул. Метрологическая, 4

Рассмотрены нормативные документы по проверке оборудования для проведения акустико-эмиссионного контроля и мониторинга промышленных объектов. Разработаны схемы и проект методики проверки параметров оборудования. Приведены результаты работ с обновленным оборудованием. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: метрология, единство измерений, проверка приборов, системы акустико-эмиссионного контроля и мониторинга, схемы измерения параметров систем

В связи с развитием науки, техники, разработкой и широким внедрением новых технологий акустико-эмиссионного (АЭ) диагностирования объектов растут требования к методикам и средствам проведения измерений различных физических величин и достоверности получаемой с их помощью информации.

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в законных единицах измерений, а характеристики погрешностей или неопределенности измерений известны с определенной вероятностью и не выходят за установленные границы [1]. Для обеспечения единства измерений специалистами на различных объектах и в разные периоды требуется разработка единой научной базы, способной обеспечивать высокое качество измерений в практической повседневной работе, а также при проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ. Измерительные системы (средства) АЭ контроля и диагностирования занимают особое место среди основных видов неразрушающего контроля основного металла конструкций и сварных соединений.

Метод АЭ на сегодня является одним из наиболее информативных благодаря измерению большого количества параметров сигналов АЭ, поступающих с объекта диагностирования. В частности: интенсивность, амплитуда сигнала, длительность, крутизна фронта, измерение разности времен прихода (РВП) сигнала на установленные на объекте датчики АЭ, частотный спектр и др.

Для обеспечения единства измерений и ответственности результатов специалистами ИЭС им. Е.О. Патона и Центра стандартизации и ме-

трологии в рамках работы Технического комитета стандартизации Украины «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (ТК 78) разработан ряд нормативных документов, которые частично удовлетворяют вышеперечисленным требованиям [2–4]. В частности, разработана методика периодической проверки электронной части АЭ диагностического комплекса ЕМА (далее – системы ЕМА) [5], установлен межповторный интервал – не более 12 месяцев. Порядок проведения проверки систем ЕМА должен включать следующие пункты: проверка комплектности, маркировки и внешнего вида; контроль работоспособности; проверка коэффициента усиления и уровня собственных шумов; контроль диапазона измерений и погрешности при измерении эффективных значений амплитуды непрерывной АЭ и амплитуды дискретных импульсов АЭ; определение неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) АЭ каналов; контроль погрешности при измерении длительности импульсов АЭ; контроль погрешности при измерении РВП сигналов АЭ; контроль погрешности при измерении амплитуды низкочастотных (НЧ) сигналов. Эти операции проводятся для каждого канала АЭ. При проведении проверки необходимо использовать рабочие эталоны и средства измерительной техники (СИТ), указанные в методике, или другие рабочие эталоны с техническими характеристиками не хуже, чем у рекомендованных. СИТ, которые используются при традиционной схеме проверки (таблица), должны быть поверены в установленном порядке.

Фото стенда для определения АЧХ преобразователей (датчиков) АЭ приведено на рис. 1.

Средства для поверки (традиционные)

Наименование рабочих эталонов	Основные метрологические характеристики	Тип
Осциллограф двухлучевой	Диапазон частот – от 10 до 10 МГц	С1-85
Генератор импульсов специальной формы – 2 (радиоимпульсов)	Диапазон частот – от 1 до 1 МГц; диапазон амплитуд – от $5 \cdot 10^{-3}$ до 5 В	Г6-28
Генератор импульсов двухканальный	Диапазон длительности импульсов – от 1 мкс до 6,5 мс; диапазон задержки между импульсами разных каналов – от 1 мкс до 65 мс	Г5-56
Генератор синусоидальных сигналов	Диапазон частот – от 10 Гц до 1 МГц; синус, прямоугольник, $U_{\text{вых}} - 5 \text{ В}$	Г3-112
Вольтметр эффективных значений	Диапазон частот – от 2 кГц до 1 МГц; диапазон амплитуд – от 1 мВ до 5 В	В3-38
Частотомер	Диапазон частот – от 10 Гц до 1 МГц. Измеряет частоту в непрерывном режиме, длительность радиоимпульса, время задержки между импульсами	Ч3-33
Источник питания постоянного тока	Установка постоянного напряжения в пределах от 0,1 до 5 В	Б5-43
Измеритель напряжений постоянного тока	Диапазон от 0,1 до 5 В	Щ 4300
Преобразователь-формирователь акустического поля (ПФАП)	$f_n = 0,1 \text{ МГц}$; $f_v = 2 \text{ МГц}$; $k_{\text{передачи}} = 10^{-10} \text{ м/В}$	–



Рис. 1. Стенд для проведения поверки датчиков АЭ систем ЕМА-3

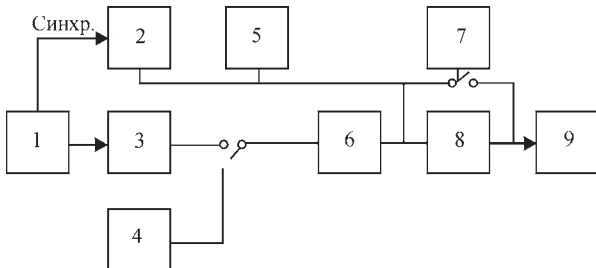


Рис. 2. Общая схема для контроля параметров АЭ каналов: 1 – генератор импульсов двухканальный Г5-56; 2 – осциллограф двухлучевой С1-85; 3 – генератор сигналов специальной формы Г6-28; 4 – нагруженный резистор сопротивлением 50 Ом; 5 – частотомер Ч3-33; 6 – переходной конденсатор емкостью 5 мкФ; 7 – вольтметр эффективных значений В3-38; 8 – промежуточный усилитель; 9 – система ЕМА

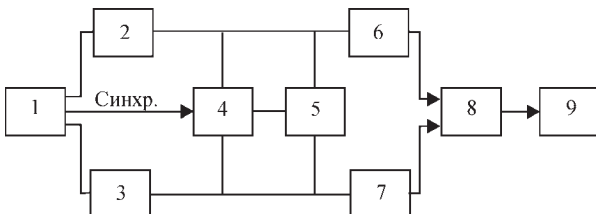


Рис. 3. Схема для контроля погрешности при измерении РВП: 1 – генератор импульсов двухканальный Г5-56; 2, 3 – генератор сигналов специальной формы Г6-28; 4 – осциллограф двухканальный С1-85; 5 – частотомер Ч3-33; 6, 7 – переходный конденсатор емкостью 5 мкФ; 8 – промежуточный усилитель; 9 – система ЕМА

Для проведения поверки были разработаны различные схемы измерений требуемых характеристик (рис. 2–5).

При этом многие указанные приборы уже устарели и имеют более современные аналоги. Кроме того, усовершенствована аппаратура систем ЕМА с учетом современных возможностей электронной базы и компьютерной техники. Расширение сферы использования приборов на базе метода АЭ для диагностирования технического состояния промышленных объектов и увеличение количества каналов АЭ в приборах требуют усовершенствования оборудования и автоматизации проведения поверки измерительной техники.

Начиная с 2017 г. в рамках темы «Разработка и исследование технологии акустико-эмиссионной диагностики и оборудования нового поколения для оценки технического состояния конструкций в промышленных условиях» целевой научной программы ОФТПМ НАН Украины «Перспективные конструкционные и функциональные материалы с длительным сроком эксплуатации, фундаментальные основы их получения, соединения и обработки», а также целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины «Надежность и долговечность материалов, конструкций, оборудования и сооружений» (Ресурс-2) с привлечением к работам специалистов, участвующих в производстве систем АЭ диагностирования, усовершен-

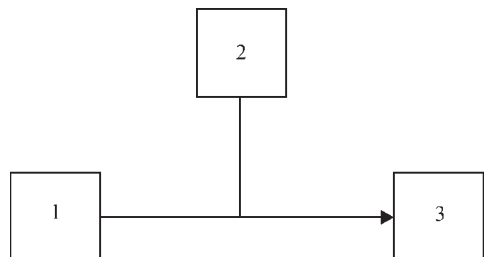


Рис. 4. Схема для контроля параметров НЧ каналов: 1 – источник постоянного тока Б5-43; 2 – измеритель напряжения Щ 4300; 3 – система ЕМА

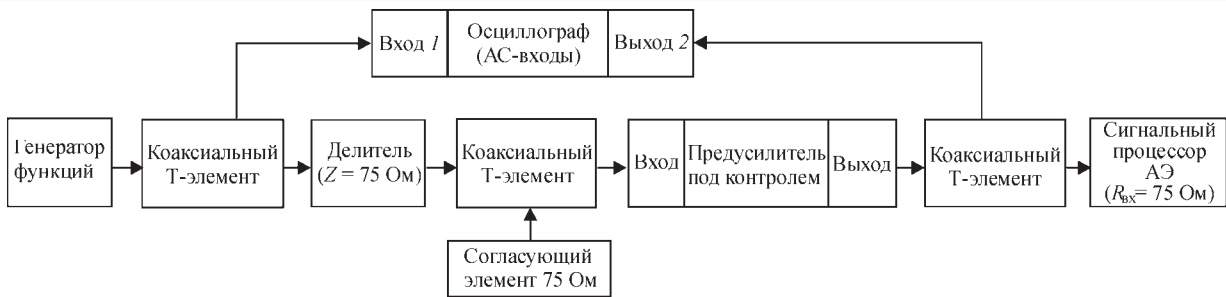


Рис. 5. Схема измерения коэффициента усиления и АЧХ



Рис. 6. Приборы для проведения поверки АЭ оборудовано методикой определения фактических характеристик отдельных блоков и узлов, входящих в системы АЭ контроля и диагностики. Современные системы контроля должны обеспечивать измерение, цифровую обработку и сохранение всех стандартных параметров сигналов АЭ (пиковая амплитуда сигнала, время прихода сигнала, длительность импульса, время нарастания импульса до пикового значения, счет (количество пересечений порогового уровня), средний уровень сигнала); определение координат источников сигналов АЭ; частотный анализ импульсов АЭ; корреляция между сигналами АЭ; интерфейс с управляющим компьютером и тестовые режимы каналов АЭ.

Разработаны, с учетом требований нормативных документов Украины и отдельных европейских стандартов в этой сфере [6, 7], а также изложенного выше, структурные схемы проведения измерений, прибор-мультиплексор, проект методики определения характеристик, программное обеспечение (ПО), которое объединяет работу генератора сигналов, мультиплексора, осциллографа, управляющего компьютера, а также проводит тест прибора.

К управляющему компьютеру посредством USB интерфейса подключаются цифровой генератор, осциллограф и мультиплексор каналов АЭ. Тестируемый АЭ прибор объединяется с компьютером посредством Ethernet подключения. Тестовое ПО на управляющем компьютере задает параметры генерируемых сигналов и получает действующие значения от цифрового осциллографа-генератора. Параллельно происходит считывание измеряемых АЭ характеристик тестируемым прибором. Процесс тестирования многоканальных АЭ систем с помощью программно-управляемого мультиплексора может проис-

ходить как параллельно по всем каналам АЭ, так и последовательно (максимальное количество одновременно подключаемых каналов – 16).

Во время выполнения тестирования прибора АЭ, ПО для тестирования передает в цифровой осциллограф-генератор заранее подготовленную программу изменения выходного сигнала генератора в зависимости от тестируемого прибора и предварительных усилителей. После запуска начала тестирования в зависимости от принятого порядка сканирования акустических каналов включается последовательный или параллельный режим мультиплексора. Программное обеспечение на управляющем компьютере начинает получать значения амплитуды и частоты с цифрового осциллографа-генератора и тестируемого прибора. На основании сохраненных массивов информации строятся все необходимые графические зависимости и формируются таблицы данных и автоматический отчет в MS Word.

Методика предполагает определение реальных характеристик тестируемых многоканальных систем по различным программам с выдачей результатов измерений в электронной и печатной формах.

Ниже на рисунках приведены вид мультиплексора, измерительного прибора ЕМА-4 и вид экрана на монитора с результатами измерений (рис. 6), а также структурная схема для проведения поверки оборудования (рис. 7).

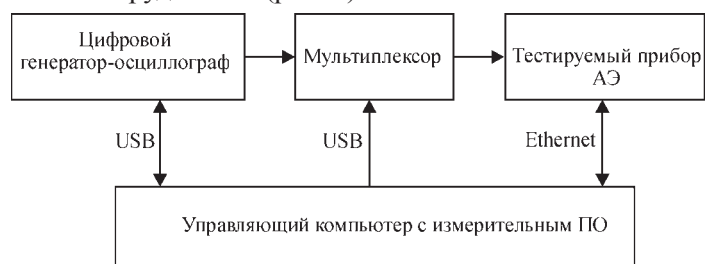


Рис. 7. Общая схема для проведения поверки

Предполагается в дальнейшем полный переход на новые методики и средства измерений.

Современные средства измерения и ПО позволяют уменьшить время проведения проверок приборов АЭ контроля, в частности, типа ЕМА, расширить перечень измеряемых величин.

Результаты проведения настройки оборудования ЕМА-4 (данные проверки АЧХ АЭ каналов системы) с использованием новых приборов и разработанной методики выборочно приведены на рис. 8.

Для проверки использовали линейный (коэффициент усиления – 40 дБ) и логарифмический режимы усиления (Gain Mode); программным путем выбирали одну из четырех полос пропускания (Filter Mode): LC 30...100; 100...300; 300...1000; 30...1000 кГц.

В таблицах на рис. 8 показаны нижняя и верхняя частота сигнала (Lower – Higher Freq., кГц), а также на графиках показан уровень сигнала на выходе (Output Level, дБ).

Для определения погрешности полученных координат источников АЭ использовали специальные образцы: полоса для линейной локации (1500 мм×50 мм×5 мм) и лист для плоскостной локации (1000 мм×1000 мм×4 мм), размеченный на квадраты 100 мм×100 мм.

На основании проведенных измерений согласована с ГП «Укрметртестстандарт» форма протокола проверки работоспособности электронной части АЭ систем ЕМА-3, 4 для дальнейшей проверки оборудования.

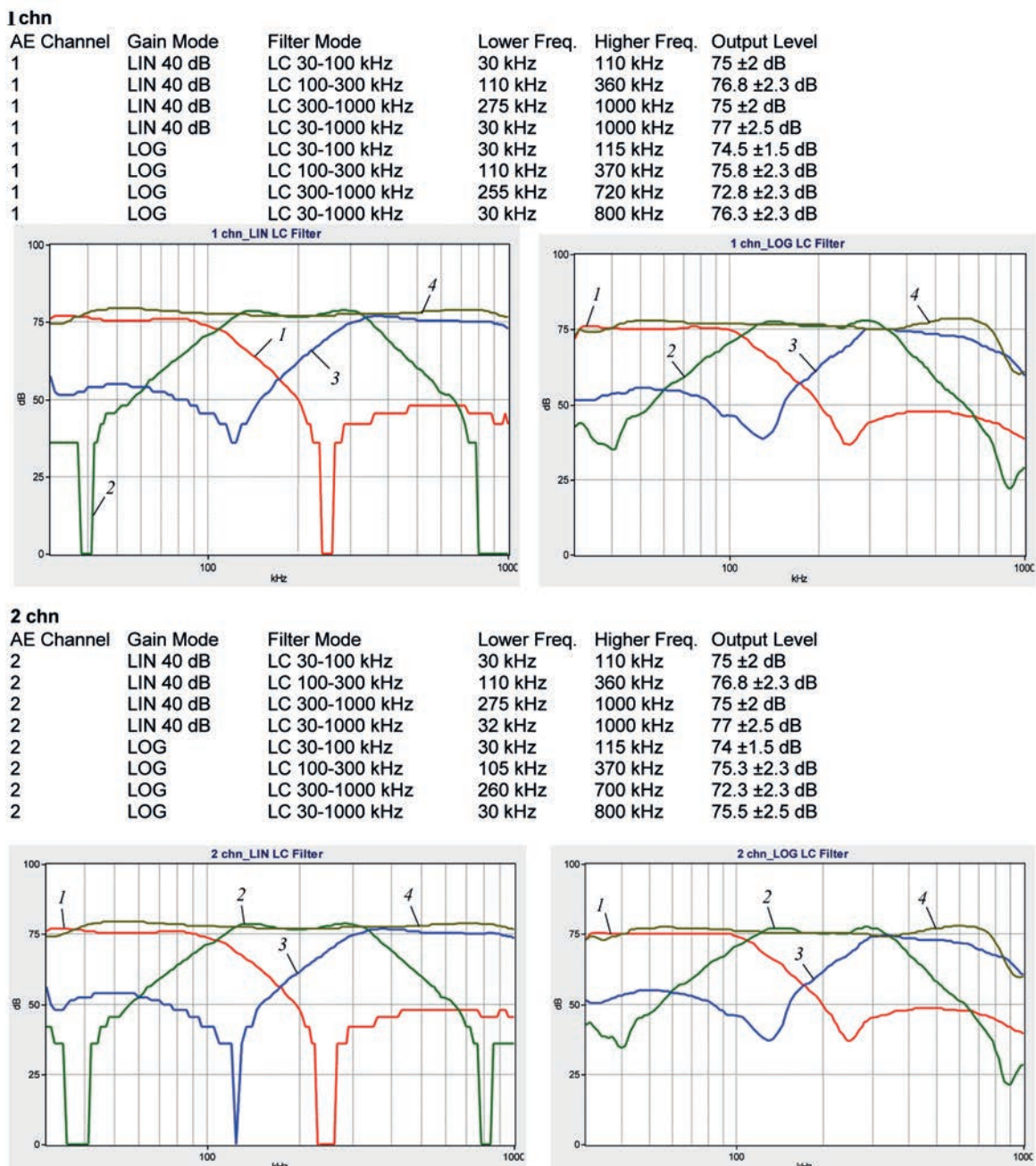


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика АЭ каналов системы ЕМА-4 для полос пропускания: 1 – 30...100 кГц; 2 – 100...300; 3 – 300...1000; 4 – 30...1000

2. Результаты исследований

2.1. Определение относительной погрешности при измерении эффективных значений амплитуды непрерывной акустической эмиссии

Номер канала	Нормированное значение амплитуды, мВ	Измеренное значение амплитуды, мВ	Пределы допустимой относительной погрешности, %	Полученное значение погрешности, %
1	450	448,9	±3,0	0,24
	200	195,5		2,25
	100	99,6		0,40
	50	48,6		2,80
	0,5	0,502		-0,40
2	450	445,2	±3,0	1,07
	200	196		2,00
	100	100,5		-0,50
	50	50,2		-0,40
	0,5	0,498		0,40
3	450	445,7	±3,0	0,96
	200	195,7		2,15
	100	99,6		0,40
	50	49,8		0,40
	0,5	0,502		-0,40

2.2. Определение относительной погрешности при измерении эффективных значений амплитуды импульсов акустической эмиссии

Номер канала	Нормированное значение амплитуды, мВ	Измеренное значение амплитуды, мВ	Пределы допустимой относительной погрешности, %	Полученное значение погрешности, %
1	450	451,8	±3,0	-0,40
	200	200		0,00
	100	98,2		1,80
	50	49,3		1,40
	0,5	0,49		2,00
2	450	450,1	±3,0	-0,02
	200	197,6		1,20
	100	99,1		0,90
	50	50,1		-0,20
	0,5	0,492		1,60
3	450	449,2	±3,0	0,18
	200	199		0,50
	100	98		2,00
	50	49,3		1,40

2.3. Определение абсолютной погрешности при измерении координат дефектов

Номера каналов	Истинное значение расстояния, м	Измеренное значение расстояния, м	Пределы допустимой относительной погрешности, м	Полученное значение погрешности, м
1, 2	0,5	0,493	±0,025	0,007
	1,0	1,01	±0,05	-0,01
	3,0	3,09	±0,15	-0,09
	5,0	4,78	±0,25	0,22
	10,0	9,79	±0,6	0,21
3,4	0,5	0,487	±0,025	0,013
	1,0	0,96	±0,05	0,04
	3,0	3,04	±0,15	-0,04
	5,0	4,89	±0,25	0,11
	10,0	9,95	±0,6	0,05
5, 6	0,5	0,51	±0,025	-0,01
	1,0	1,02	±0,05	-0,02
	3,0	2,94	±0,15	0,06
	5,0	5,15	±0,25	-0,15
	10,0	10,22	±0,6	-0,22

Рис. 9. Протокол (фрагмент) проверки работоспособности электронной части АЭ системы ЕМА

Рекомендуемый вариант протокола (фрагмент) проверки работоспособности электронной части АЭ системы ЕМА представлен на рис. 9.

Выводы

В связи с совершенствованием оборудования для проведения АЭ контроля и мониторинга объектов промышленности, увеличением количества каналов АЭ в приборах, а также необходимости обновления существующих методик поверки систем разработано соответствующее оборудование (в частности, для поверки систем ЕМА-3, 4), разработаны схемы для проведения проверки оборудования и создана предварительная методика выполнения операций поверки, что позволит автоматизировать процесс проведения поверки систем АЭ контроля и мониторинга и сократит время проведения поверки.

Список литературы

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/shon/1314-18>.
2. (2002) МДУ 016/10-2002 Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси. Методика державної метрологічної атестації.
3. (2002) МДУ 017/10-2002 Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси.

4. (2004) МПУ 002/10-22-2004 Метрологія. АЕ діагностичний комплекс ЕМА (електронна частина). Методика повірки.
5. (2006) Методика перевірки працездатності електронної частини акустико-емісійного комплексу ЕМА.
6. ДСТУ EN 13477-1:2016 (EN 13477-1:2001, IDT) Неруйнівний контроль. Акустична емісія. 7. Характеристика устаткування. Частина 1. Технічні характеристики устаткування.
7. ДСТУ EN 13477-2:2016 Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Характеристика устаткування. Частина 2. Експлуатаційні показники (EN 13477-2:2010, IDT)

References

1. Law of Ukraine «On metrology and metrological activity». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/shon/1314-18> [in Ukrainian].
2. (2002) MDU 016/10-2002: Multichannel acoustic emission diagnostic complexes. Procedure of state metrological certification [in Ukrainian].
3. (2002) MDU 017/10-2002: Multichannel acoustic emission diagnostic complexes [in Ukrainian].
4. (2004) MPU 002/10-22-2004: Metrology. AE diagnostic complex EMA (electronic components). Checking procedure [in Ukrainian].
5. (2006) Procedure for checking the serviceability of electronic components of acoustic emission complex EMA [in Ukrainian].
6. DSTU EN 13477-1:2016 (EN 13477-1:2001, IDT): Nondestructive testing. Acoustic emission. Description of equipment. Pt 1: Equipment characterization [in Ukrainian].
7. DSTU EN 13477-2:2016: Nondestructive testing. Acoustic emission. Description of equipment. Pt 2: Verification of equipment characteristics (EN 13477-2:2010, IDT) [in Ukrainian].

ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЄСТРАЦІЇ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД

А.Я. Недосєка¹, С.А. Недосєка¹, М.А. Яременко¹, Я. Гереб², М.А. Овсієнко¹, С.О. Кушніренко³, А.П. Іващенко⁴

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

²Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalas u. 28

³Одеський припортовий завод. 65001, м. Одеса, Головопштамт а/с № 304

⁴ДП «Укрметртестстандарт». 03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 4

Розглянуто нормативні документи по перевірці обладнання для проведення акустико-емісійного контролю та моніторингу промислових об'єктів. Розроблено схеми та проект методики перевірки параметрів обладнання. Наведено результати робіт з оновленим устаткуванням. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: метрологія, єдність вимірювань, повірка приладів, системи акустико-емісійного контролю та моніторингу, схеми вимірювання параметрів систем

TECHNOLOGY OF EVALUATION OF THE VALIDITY OF RECORDING ACOUSTIC EMISSION INFORMATION IN DIAGNOSTICS OF STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

A.Ya. Nedoseka¹, S.A. Nedoseka¹, M.A. Yaremenko¹, J. Gereb², M.A. Ovsienko¹, S.A. Kushnirenko³, A.P. Ivashchenko⁴

¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalas u. 28

³Odessa Port Plant. General Post Office PO Box No.304, 65001, Odessa, Ukraine.

⁴SC «Ukrmetrteststandart». 4 Metrologicheskaya Str., 03143, Kyiv, Ukraine

Normative documents on calibration of equipment for acoustic emission control and monitoring of industrial facilities are considered. Schemes and a draft of the procedure for checking the equipment parameters have been developed. The paper gives the results of work performance with upgraded equipment. 7 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: metrology, unity of measurements, instrument calibration, systems of acoustic emission control and monitoring, schemes of measurement of system parameters

Поступила в редакцію

28.05.2019

НОВИЙ ПІДХІД ЩОДО ПОБУДОВИ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ОДНОКАНАЛЬНИХ ДЕФЕКТΟΣКОПІВ

В.Г. Рибачук, В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

Запропоновано новий підхід щодо побудови багатоелементних параметричних вихрострумівих перетворювачів для роботи з одноканальними вихрострумівими дефектоскопами. На прикладі чотирьохелементного перетворювача з лінійним розміщенням обмоток показано ефективність даного класу вихрострумівих перетворювачів для виявлення коротких тріщин у виробів із алюмінієвих та титанових сплавів. Досліджено вплив відстані між обмотками на індуктивність та чутливість багатоелементного вихрострумівого перетворювача. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: багатоелементний вихрострумівий перетворювач, вихрострумівий дефектоскоп, обмотка індуктивності, індуктивність, електричний опір, стандартний зразок, тріщина, годограф, комплексна площина

Вихрострумівий метод має велике значення для неруйнівного контролю конструкцій [1–5]. При цьому часто виникає необхідність у виявленні дефектів у виробів з великою площею поверхні. Сканування такої поверхні вихрострумівими перетворювачами (ВСП) у ручному режимі є трудомістким і малопродуктивним процесом з великою ймовірністю пропуску дефекта. Можливим рішенням цієї проблеми є використання багатоелементних ВСП, при якому здійснюють послідовне опитування елементів ВСП шляхом їх почергового підключення до дефектоскопа за допомогою комутатора (мультиплексора). Такий підхід реалізовано в спеціалізованих багатоканальних дефектоскопах, серед яких найвідоміші дефектоскопи американської фірми OLYMPUS і канадської фірми EDDYFI [6–12]. Недоліком такої апаратури є висока ціна, що суттєво обмежує її використання. Інший підхід полягає у одночасному опитуванні всього масиву елементів багатоелементного ВСП. Такий підхід можна використовувати, коли відсутня необхідність визначати координати виявленого дефекту (необхідно тільки виявити його).

Поставлено задачу розробити принципи побудови багатоелементних параметричних ВСП, придатних для застосовування з одноканальними дефектоскопами. Використання таких ВСП під час обстеження виробів з великою площею поверхні дозволить суттєво підвищити продуктивність контролю.

Принцип побудови багатоелементних параметричних ВСП для роботи з одноканальними вихрострумівими дефектоскопами. Для роботи з одноканальними дефектоскопами імпеданс багатоелементного ВСП (БВСП) має бути близь-

ким (а в ідеальному випадку рівним) до імпедансу окремого елемента. Це дозволяє його роботу на частоті, яка визначена як оптимальна для одноелементного ВСП, що важливо для реалізації резонансного або автогенераторного режимів вихрострумівого контролю [2].

За відсутності взаємної індукції еквівалентні параметри послідовно та паралельно з'єднаних n ідентичних обмоток підпорядковуються наступним співвідношенням [13]: еквівалентна індуктивність $L_{\text{екв}} = nL$ та еквівалентний активний опір $R_{\text{екв}} = nR$ для послідовного з'єднання і, відповідно, $L_{\text{екв}} = L/n$ та $R_{\text{екв}} = R/n$ для паралельного з'єднання (L та R – індуктивність та активний опір однієї обмотки). Ідентичність електричних параметрів (індуктивності і активного електричного опору) БВСП параметрам однієї окремої обмотки можна досягнути комбінацією послідовного та паралельного з'єднання обмоток БВСП таким чином, щоб збільшення індуктивності і активного опору послідовно з'єднаних обмоток компенсувалося зменшенням їх за рахунок паралельного включення. Для цього всю сукупність обмоток БВСП необхідно розділити на окремі групи. Спосіб з'єднання обмоток в межах усіх груп повинен бути однаковим (послідовним або паралельним), а групи з'єднуються між собою також однаковим чином, причому спосіб їх з'єднання повинен бути протилежним способу з'єднання обмоток у групах. Очевидно, що при цьому кількість обмоток у групах та кількість груп повинні бути однаковими. Це накладає певні обмеження на загальну кількість обмоток БВСП. Мінімальна кількість обмоток такого БВСП дорівнює чотирьом, тобто маємо у складі дві групи по дві обмотки. Узагальнюючи можна сказати, що загальна кількість

n ідентичних індуктивних обмоток БВСП повинна задовільняти умові $n = k^2$ (k – довільне натуральне число більше одиниці; за $k = 1$ маємо одноелементний ВСП). Вся сукупність обмоток БВСП розбита на k груп по k індуктивних обмоток у групі. Причому обмотки кожної групи з'єднані між собою послідовно (паралельно) та усі групи обмоток з'єднано паралельно (послідовно) [14]. Такі БВСП можна підключати до одноканальних вихрострумових дефектоскопів і працювати на робочій частоті, яка є оптимальною для роботи окремої індуктивної обмотки.

Можливі два варіанти з'єднання обмоток БВСП. Розглянемо їх на прикладі БВСП, що складається із дев'яти елементів (тобто для випадку $k = 3$) [14]. При першому варіанті (рис. 1, а) сукупність із дев'яти ідентичних обмоток розбивається на три групи по три обмотки у кожній. Тут L_{11}, L_{12}, L_{13} – індуктивні обмотки першої групи; L_{21}, L_{22}, L_{23} – індуктивні обмотки другої групи; L_{31}, L_{32}, L_{33} – індуктивні обмотки третьої групи. Індуктивні обмотки кожної групи з'єднані послідовно, а між собою усі три групи з'єднані паралельно. Еквівалентна індуктивність першої групи індуктивних обмоток становить $L_1 = L_{11} + L_{12} + L_{13} = 3L$ (де L – індуктивність окремої обмотки). Аналогічно індуктивності обмоток другої і третьої груп будуть також дорівнювати $L_2 = L_3 = 3L$. Еквівалентна індуктивність дев'ятиелементного параметричного БВСП, який складається із трьох паралельно з'єднаних груп обмоток з індуктивностями $L_1 = L_2 = L_3 = 3L$ дорівнює $L_{\text{ВСП}} = L$. Таким чином, загальна еквівалентна індуктивність дев'ятиелементного ВСП (рис. 1, а) дорівнює індуктивності однієї окремої обмотки. Подібним чином можна показати, що еквівалентний електричний опір цього БВСП дорівнює $R_{\text{ВСП}} = R$.

Другий варіант з'єднання обмоток дев'ятиелементного параметричного БВСП (рис. 1, б) відрізняється від першого іншим складом груп та способом з'єднання обмоток в межах груп та новоутворених груп між собою. Тут першу групу утворюють обмотки L_{11}, L_{21} і L_{31} ; другу – обмотки L_{12}, L_{22} і L_{32} ; третю – обмотки L_{13}, L_{23} і L_{33} . Індуктивні обмотки в межах кожної з цих трьох груп з'єднані паралельно, а між собою усі три групи з'єднані послідовно. Можна показати, що і для цього варіанту з'єднання обмоток еквівалентні індуктивність та електричний опір дев'ятиелемент-

ного параметричного БВСП дорівнюють $L_{\text{ВСП}} = L$ та $R_{\text{ВСП}} = R$, відповідно.

Взаємне просторове розміщення обмоток у БВСП вибирають залежно від форми дефектів, які підлягають виявленню, а також від заданої чутливості та локальності контролю. Обмотки можуть розташовуватися в один ряд або у декілька рядів (наприклад, у шаховому порядку). Для забезпечення суцільного контролю ділянки поверхні виробу та запобігання пропуску дефектів необхідно, щоб робочі зони контролю його елементів (обмоток) перекривалися.

Досліджувані ВСП, зразки з дефектами, прилади контролю та методика експерименту. Для дослідження запропонованих БВСП були виготовлені два чотирихелементні параметричні накладні БВСП (за № 1 і № 2) та одноелементний ВСП з однаковими конструктивними параметрами обмоток. Кожна обмотка налічує 26 витків проводу діаметром 0,07 мм, намотаних на феритових осердях діаметром 1,2 мм та довжиною 6 мм. Довжина обмоток – 2,2 мм, відстань від робочого торця осердя до обмотки 0,08 мм. У обох БВСП обмотки встановлено лінійно в один ряд, але у БВСП № 1 вони стояли впритул, а у БВСП за № 2 – рознесені на відстань 1,2 мм (відповідає діаметру феритових осердь).

Для досліджень використано стандартні зразки (СЗ) з поверхневими дефектами із алюмінієвого сплаву Д16 та титанового сплаву ВТЗ. Два з них призначені для імітування тріщин довжиною 2 мм, розкриттям 0,1 мм та глибиною 0,2 мм і 0,5 мм (для алюмінієвого сплаву) та 0,5 мм (для титанового сплаву). Поверхневі штучні дефекти нанесено електророзрядним методом. Третій зразок із алюмінієвого сплаву Д16 містить свердлення діаметром 0,5 мм та глибиною 0,5 мм. Під час дослідження взаємного впливу обмоток БВСП використовували четвертий СЗ зі сталі 45 без дефекту.

Для дослідження сигналів від дефектів використовували універсальний вихрострумовий дефектоскоп Eddyson С [15, 16] у резонансному режимі. БВСП під'єднували до дефектоскопа і переводили останній у резонансний режим роботи з параметричними ВСП (режим «Single»). Після цього відводили БВСП у повітря та здійснювали автоматичний підбір конденсатора резонансного контуру (клавіша «AUTO ADJUST»). По завершенню цієї процедури ВСП встановлювали на бездефектну ділянку поверхні СЗ і проводили його балансування (кла-

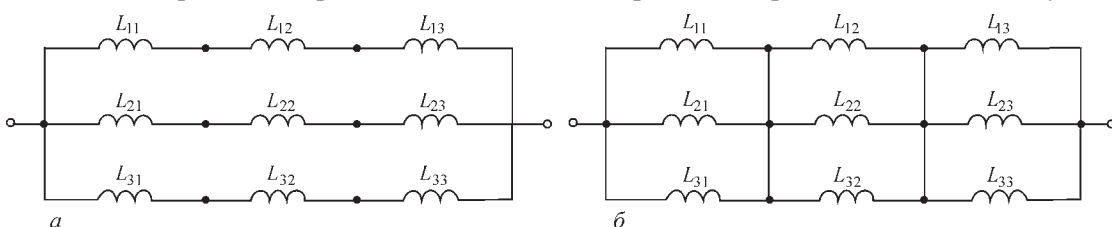


Рис. 1. Варіанти схем з'єднання обмоток дев'ятиелементного параметричного БВСП

Індуктивності одноелементного та чотирьохелементних параметричних ВСП

Режим роботи	Індуктивність, мкГн		
	Одноелементний ВСП	Чотирьохелементний ВСП № 1	Чотирьохелементний ВСП № 2
ВСП у «повітрі»	4,7	8,2	4,7
ВСП на СЗ із алюмінієвого сплаву	4,4	8,0	4,4
ВСП на СЗ зі сталі 45	8,5	11,4	9,5

віша «NULL»). Після цього здійснювали сканування поверхні СЗ в зоні дефекту та реєстрували сигнали від дефекту в комплексній площині на екрані дефектоскопу. Фазу опорної напруги підбирали таким чином, щоб годограф сигналу, викликаний зміною зазору між БВСП та поверхнею СЗ, змінювався по горизонтальній осі. Основні параметри контролю під час експериментів наступні: робоча частота – 1 МГц; попереднє підсилення – 6 дБ; підсилення – 8 дБ (при дослідженні чутливості до локальних дефектів – 10 дБ); вертикальне підсилення – 18 дБ (при дослідженні чутливості до локальних дефектів – 20 дБ); амплітуда напруги збудження генератора дефектоскопа – 2 В. Вимірювання індуктивності обмоток БВСП здійснювали приладом типу МТ4080D на частоті 10 кГц та напрузі збудження 1 В.

Результати дослідження чотирьохелементних параметричних БВСП. Розглянутий вище принцип роботи БВСП не враховує взаємного впливу сусідніх обмоток, який відчутний за малої відстані між ними. Для оцінки цього впливу на параметри БВСП проведено вимірювання індуктивностей БВСП з різною відстанню між обмотками (№ 1 і № 2) та індуктивності одноелементного ВСП під час розміщення їх у повітрі, на бездефектних ділянках СЗ із алюмінієвого сплаву Д16 і сталі 45. Результати подано в таблиці.

Аналіз даних таблиці свідчить, що відстань між обмотками чотирьохелементних ВСП суттєво впливає на їх основний електричний параметр – індуктивність. Зокрема для БВСП з обмотками, розміщеними впритул одна до одної (№ 1), індуктивність у повітрі у 1,7 рази перевищує індуктивність одноелементного ВСП. Під час встановлення ВСП на СЗ із алюмінієвого сплаву Д16 це перевищення становить 1,8 рази, а при встановленні на СЗ зі сталі 45 – 1,3 рази. Для багатоеlementних параметричних ВСП, обмотки яких мають сильний індуктивний зв'язок, еквівалентна індуктивність суттєво перевищує індуктивність окремого елемента, тобто співвідношення $L_{\text{ВСП}} = L$ не виконується. Тому їх застосування разом з одноканальними вихрострумовими дефектоскопами може вимагати суттєвого переналаштування останніх. Особливо це стосується дефектоскопів автогенераторного типу. Проте зі збільшенням відстані між обмотками зв'язок між ними суттєво послаблюється. Так, індуктивність чотирьохелементного ВСП № 2, обмотки якого рознесено на 1,2 мм, дорівнює індуктивності од-

ноелементного ВСП за їх розміщення у повітрі та на СЗ із алюмінієвого сплаву Д16. І тільки під час встановлення на СЗ зі сталі 45 індуктивність чотирьохелементного ВСП № 2 є більша у 1,1 рази за індуктивність одноелементного, що можна пояснити посиленням індуктивного зв'язку між обмотками за рахунок магнітних властивостей сталі. Таким чином, можна вважати, що умова ідентичності електричних параметрів БВСП параметрам одноелементного ВСП (окремого елемента) виконується шляхом рознесення обмоток на відстань, співмірну або більшу за діаметр осердь, на яких вони намотані.

Дослідження сигналів БВСП від дефектів здійснювали шляхом сканування СЗ перпендикулярно до напрямку тріщини за трьох варіантів взаємного положення її відносно обмоток ВСП. Під час сканування за варіантом 1 центр ВСП проходить над серединою тріщини (рис. 2). Під час сканування за варіантом 2 над тріщиною проходять дві крайні обмотки 3 і 4. Під час сканування за варіантом 3 над тріщиною проходить тільки одна крайня обмотка 4. Годографи сигналів від тріщин у СЗ із алюмінієвого та титанового сплавів, отримані з БВСП № 1, подано на рис. 3.

Представлені результати показують високу чутливість розробленого БВСП до дефектів в алюмінієвому та титановому сплавах за різних варіантів сканування з можливістю виділення сигналів від дефектів на фоні завад, пов'язаних зі зміною зазору, за рахунок різного напрямку відповідних годографів. Сигнали від тріщин в алюмінієвому СЗ розміщені у другому квадранті комплексної площини (рис. 3, а, в, д), а від тріщини у титановому СЗ – у третьому квадранті під час сканування за варіантом 1 (рис. 3, б) та у друго-

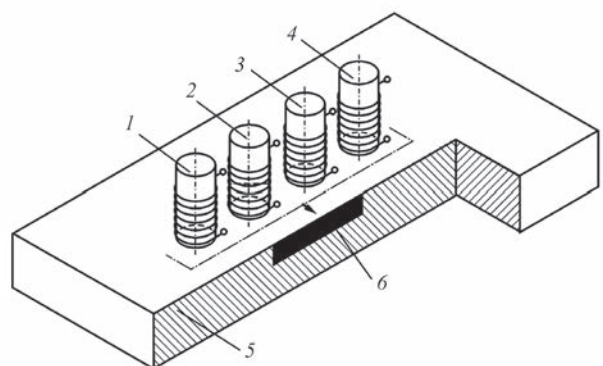


Рис. 2. Схема контролю БВСП: 1–4 – індуктивні обмотки; 5 – СЗ; 6 – тріщина

му квадранті під час сканування за варіантами 2 (рис. 3, *з*) і 3 (рис. 3, *е*). Годографи від зміни зазору орієнтовані в горизонтальному напрямку. Кут між годографами сигналів від дефектів і від зміни зазору дорівнює приблизно 75° , що дозволяє їх легко розрізняти. За амплітудою сигнали від тріщини меншої глибини (0,2 мм) в алюмінієвому СЗ та тріщини більшої глибини (0,5 мм) у титановому СЗ під час сканування за варіантами 1 (рис. 3, *а*, *б*) та 3 (рис. 3, *д*, *е*) практично однакові. Під час сканування за варіантом 2 співвідношення між амплітудами сигналів від вказаних дефектів збільшується до 1,2 разів на користь сигналу від тріщини у алюмінієвому СЗ (рис. 3, *в* годограф 1, *з*). Тобто чутливість до дефекту у титановому СЗ є меншою, що можна пояснити суттєво меншою електропровідністю титанового сплаву.

Під час сканування СЗ за варіантом 2 (рис. 3, *в*, *з*) амплітуда сигналів від дефектів збільшується порівняно зі скануванням за варіантом 1 (рис. 3, *а*, *б*). Для тріщин в алюмінієвому СЗ чутливість зростає майже удвічі, а для тріщин у титановому СЗ – приблизно у 1,5 рази. Форма годографів та їх орієнтація для алюмінієвого СЗ є аналогічною варіанту сканування 1. Для сигналу від тріщини у титановому СЗ (рис. 3, *з*) годограф зміщується у

другий квадрант комплексної площини і в цьому відношенні стає подібними до годографів, отриманих на алюмінієвому СЗ. Під час сканування за варіантом 3 сигнал від однієї і тієї ж тріщини в СЗ із алюмінієвого сплаву (рис. 3, *д*) є несуттєво менший за амплітудою, ніж для 1-го варіанту сканування (рис. 3, *а*). Сигнал від тріщини у титановому СЗ (рис. 3, *е*) за амплітудою є практично ідентичним до сигналу, отриманого за 1-го варіанту сканування (рис. 3, *б*).

Максимуми амплітуд, наведених на рис. 3 сигналів, відповідають положенню, коли центри обмоток чотирьохелементного ВСП знаходяться над тріщинами. Співвідношення між ними добре узгоджуються з відомими розрахунками модуля внесеного імпедансу однообмоточного параметричного ВСП від тріщин різної довжини [17]. При цьому враховано, що приведена довжина тріщин $l'_{тр} = l_{тр} / D_c$ (де $l_{тр}$ – довжина тріщини; D_c – середній діаметр обмотки) дорівнює 1,67 (вважаємо, що D_c співпадає з діаметром феритового осердя і становить 1,2 мм).

Для оцінки впливу відстані між елементами на чутливість до локальних дефектів досліджено сигнали чотирьохелементних ВСП з різним рознесенням обмоток (№ 1 і № 2) від свердлення в алюмінієвому СЗ за різного взаємного положення дефекту та обмоток ВСП у процесі сканування. Це важливо для оцінювання потенційної небезпеки пропуску локального дефекту під час використання БВСП з рознесеними обмотками. Результати у вигляді відповідних годографів сигналів від дефекту подано на рис. 4. Їх аналіз показує, що для всіх досліджених варіантів взаємного положення дефекту та обмоток, чотирьохелементний ВСП № 1 з обмотками, встановленими впритул (рис. 4, *а*, *в*, *д*, *е*), має більшу чутливість, ніж чотирьохелементний ВСП № 2 з рознесеними обмотками (рис. 4, *б*, *г*, *е*, *ж*). Проте і для другого варіанта конструкції чотирьохелементного ВСП сигнал від зазначеного дефекту є достатнім для його надійного виявлення. Максимальна чутливість до локального дефекта досягається, коли в процесі сканування над ним проходить стик (або проміжок) між однією з крайніх та сусідньою центральною обмотками чотирьохелементних ВСП (рис. 4, *д*, *е*). Вона зменшується у 1,4 рази, коли над дефектом проходить стик (проміжок) між центральними обмотками ВСП (рис. 4, *е*, *ж*). Чутливість до локальних дефектів є найменшою (у 2,5 рази порівняно з максимальним значенням), коли безпосередньо над дефектом проходить одна з крайніх обмоток чотирьохелементних ВСП (рис. 4, *в*, *з*). Але і в цьому випадку сигнал є достатнім для надійного виявлення дефекту навіть для конструкції з рознесеними обмотками (рис. 4, *з*).

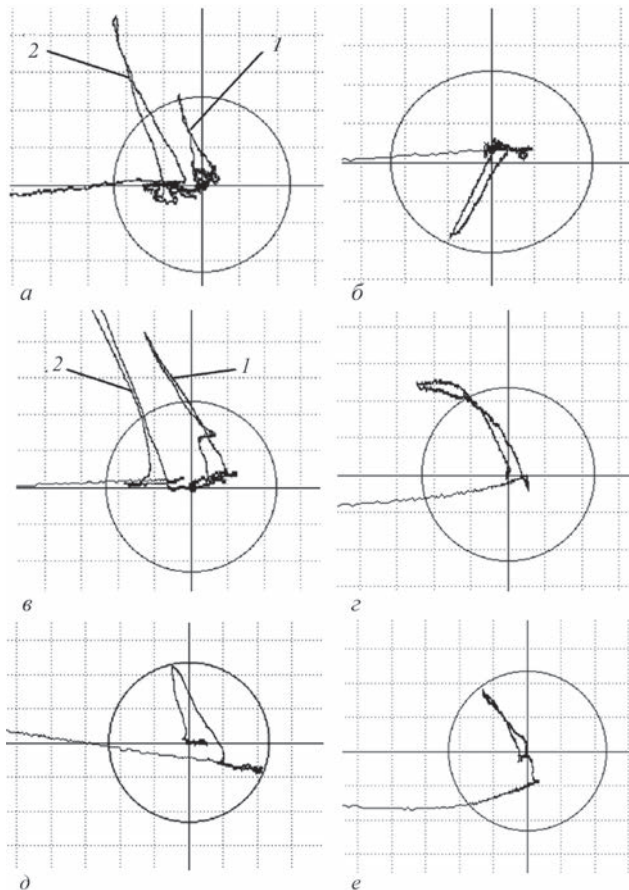


Рис. 3. Годографи сигналів чотирьохелементного ВСП від дефектів типу тріщини глибиною 0,2 мм (1) і 0,5 мм (2) в алюмінієвому сплаві (*а*, *в*, *д*) та глибиною 0,5 мм в титановому сплаві (*б*, *г*, *е*) для варіантів сканування 1 (*а*, *б*), 2 (*в*, *г*) і 3 (*д*, *е*)

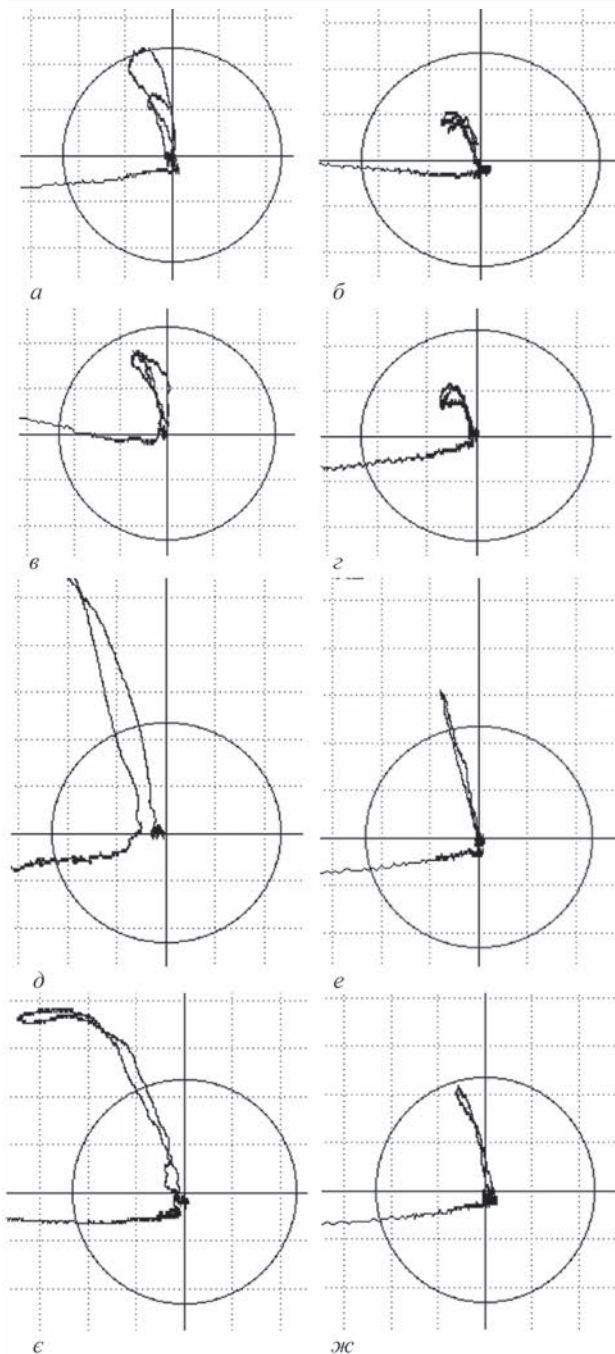


Рис. 4. Годографи сигналів БВСП № 1 (а, в, д, ж) та № 2 (б, г, е, з) від свердлення, коли над дефектом проходить одна із центральних обмоток (а, б); одна із крайніх обмоток (в, г); стик між крайньою та сусідньою центральною обмотками (д, е) і проміжок між крайньою та сусідньою центральною обмотками (ж, з)

Висновки

Запропоновано принцип побудови параметричних БВСП для роботи з одноканальними вихрострумовими дефектоскопами. Встановлено, що для забезпечення еквівалентності електричних параметрів БВСП електричним параметрам параметричного ВСП з однією обмоткою необхідно, щоб загальна кількість n їх ідентичних індуктивних обмоток задовільняла умові $n = k^2$, (k – довільне натуральне число більше 1), а вся сукупність з

n обмоток була розбита на k груп по k індуктивних обмоток у кожній групі. Характер з'єднання обмоток між собою у межах всіх груп повинен бути однаковим (послідовний або паралельний) і протилежним характеру з'єднання між групами. Встановлено, що збільшення відстані між обмотками до величини, співмірної з їх діаметром, дозволяє усунути взаємний вплив між ними.

Експериментально досліджено чотирьохелементний БВСП ($k = 2$) з лінійним розміщенням обмоток. Показано його високу чутливість до коротких тріщин та локальних дефектів у виробках із алюмінієвих та титанових сплавів. Чутливість найбільша, коли під час сканування БВСП проходить над дефектом двома крайніми обмотками. Коли над дефектом проходить тільки одна з крайніх обмоток, чутливість зменшується у 2,5 рази відносно максимальної, але залишається достатньою для його надійного виявлення.

Список літератури

1. Libby H.L. (1971) *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*. New-York, Wiley Interscience.
2. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
3. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. (1983) *Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий*. Москва, Энергоатомиздат.
4. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. (1992) *Не разрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практ. пособие*. Сухоруков В.В. (ред.). Москва, Высшая школа.
5. Учанін В.М. (2013) *Вихрострумові накладні перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Сполом.
6. Gramz M., Stepinski T. (1994) Eddy current imaging array sensors and flaw reconstruction. *Research in Nondestructive Evaluation*, 5, 3, 157–174.
7. Hardy F., Samson R. (2002) *Eddy current probe with multi-use coils and compact configuration*, USA, Pat. № 6344739, G01N27/90.
8. Decure J.-M., Premel D., Mangenet G. et al. (2006) Flexible EC array probe for the inspection of complex parts developed within the European VERDICT Project. *9th Europ. Conf. on Non-destructive Testing. Berlin, 2006*.
9. Mook G., Michel F., Simonin J. (2008) Electromagnetic imaging using ptobe arrays. *17th World Conf. on Non-destructive Testing. Shanghai, 2008*.
10. Bureau J.-F., Ward R.C., Julien A. (2012) Application of eddy current array technology to surface inspection. *18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban (South Africa), 2012*.
11. (2017) International Standard ISO 20339:2017 (E). *Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification*. Geneva, ISO/TC 135/SC 4.
12. Учанін В.М. (2018) Пропозиції щодо вдосконалення класифікації вихрострумових перетворювачів. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 68–74.
13. Калантаров П.Л., Нейман Л.Р. (1948) *Теоретические основы электротехники. В 3-х частях. Ч. 2. Теория переменных токов*. Ленинград–Москва, Гос. энерг. изд-во.
14. Учанін В.М., Рибачук В.Г., Кириченко І.І., Дереча В.Я., Семенець О.І. (2018) *Накладний багатоелементний вихрострумовий перетворювач*. Заявка на винахід № а 2018 07627.
15. Uchanin V., Lutsenko G., Opanasenko A., Dzhaganian A. (2016) PROMPRYLAD Family of Eddy Current Flaw

- Detectors – From Simple to more Complicated. *19th World Conf. on Non-destructive Testing. Munich, 2016.*
16. (2014) *Дефектоскоп вихретоковый «Eddycon C»*. Руководство по эксплуатации. ЕС.14327992.01.13 РЭ. Киев, ООО «Ультракон-сервис».
 17. Учанін В.М. (2007) Особливості просторового розподілу сигналу вихреструмового перетворювача від тріщин різної довжини. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **4**, 121–124.
- References**
1. Libby, H.L. (1971) *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*. New-York, Wiley Interscience.
 2. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 3. Gerasimov, V.G., Klyuev, V.V., Shaternikov, V.E. (1983) *Methods and devices of electromagnetic testing of industrial products*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
 4. Gerasimov, V.G., Pokrovsky, A.D., Sukhorukov, V.V. (1992) *Nondestructive testing*. In: 5 books. Book 3: Electromagnetic testing. Pract. manual. Ed. by V.V. Sukhorukov. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
 5. Uchanin, V.M. (2013) *Eddy current put-on double differentiation transducers*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
 6. Gramz, M., Stepinski, T. (1994) Eddy current imaging array sensors and flaw reconstruction. *Research in Nondestructive Evaluation*, **5**(3), 157–174.
 7. Hardy, F., Samson, R. (2002) *Eddy current probe with multi-use coils and compact configuration*, USA, Pat, № 6344739, G01N27/90.
 8. Decure, J.-M., Premel, D., Mangenet, G. et. al. (2006) Flexible EC array probe for the inspection of complex parts developed within the European VERDICT Project. *In: Proc. of 9th Europ. Conf. on Non-destructive Testing. Berlin, 2006.*
 9. Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2008) Electromagnetic imaging using probe arrays. *In: Proc. of 17th World Conf. on Non-destructive Testing. Shanghai, 2008.*
 10. Bureau, J.-F., Ward, R.C., Julien, A. (2012) Application of eddy current array technology to surface inspection. *In: Proc. of 18th World Conf. on Nondestructive Testing. Durban (South Africa), 2012.*
 11. (2017) International Standard ISO 20339:2017 (E): *Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification*. Geneva, ISO/TC 135/SC 4.
 12. Uchanin, V.M. (2018) Propositions on improvement of the classification of eddy current transducers. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 68–74 [in Russian].
 13. Kalantarov, P.L., Nejman, L.R. (1948) *Theoretical principles of electrical engineering*. In: 3 Pts. Pt 2: Theory of alternating currents. Leningrad-Moscow, Gos.Energ. Izd-vo [in Russian].
 14. Uchanin, V.M., Rybachuk, V.G., Kyrychenko, I.I., Derecha, V.Ya., Semenets, O.I. (2018) *Put-on multielement eddy current transducer*. Applic. No. a 2018 07627 [in Ukrainian].
 15. Uchanin, V., Lutsenko, G., Opanasenko, A., Dzhaganian, A. (2016) PROMPRYLAD family of eddy current flaw detectors – from simple to more complicated. *In: Proc. of 19th World Conf. on Non-destructive Testing. Munich, 2016.*
 16. (2014) *Eddy current flaw detector «Eddycon C»*. Operating instructions. ES.14327992.01.13 RE. Kiev, LLC Ultracon-service [in Russian].
 17. Uchanin, V.M. (2007) Features of spatial distribution of eddy current transducer signal from cracks of different length. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **4**, 121-124 [in Ukrainian].

НОВЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОДНОКАНАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

В.Г. Рыбачук, В.Н. Учанин

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенко НАН України. 79060, г. Львів, ул. Научна, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

Предложен новый подход к построению многоэлементных параметрических вихретоковых преобразователей для работы с одноканальными вихретоковыми дефектоскопами. На примере четырехэлементного преобразователя с линейным размещением обмоток показана эффективность данного класса вихретоковых преобразователей для выявления коротких трещин в изделиях из алюминиевых и титановых сплавов. Исследовано влияние расстояния между обмотками на индуктивность и чувствительность многоэлементного вихретокового преобразователя. Библиогр. 17, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: многоэлементный вихретоковый преобразователь, вихретоковый дефектоскоп, обмотка индуктивности, индуктивность, электрическое сопротивление, стандартный образец, трещина, годограф, комплексная плоскость

NEW APPROACH TO DESIGNING MULTIELEMENT PARAMETRIC EDDY CURRENT TRANSDUCERS FOR SINGLE-CHANNEL FLAW DETECTORS

V.G. Rybachuk, V.M. Uchanin

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.
E-mail: vuchanin@gmail.com

A new approach is proposed to designing multielement parametric eddy current transducers for operation with single-channel eddy-current flaw detectors. Four element transducer with linear arrangement of the windings is used as an example to show the effectiveness of this class of eddy current transducers for detection of short cracks in products from aluminium and titanium alloys. The influence of winding spacing on inductance and sensitivity of multielement eddy current transducer was studied. 17 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: multielement eddy current transducer, eddy current flaw detector, inductance winding, inductance, electric resistance, standard sample, crack, hodograph, complex plane

Надійшла до редакції
01.07.2019

НОВА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

В.Р. Скальський, О.М. Мокрий, П.П. Великий, П.М. Долішній, Я.Д. Толопко

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: skalsky.v@gmail.com

Розглянуто особливості вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль за допомогою контактної перетворювача, в якого збуджуюча та приймальна частини жорстко з'єднані між собою. Запропоновано нову методику вимірювання швидкості таким перетворювачем з використанням зразка порівняння. Здійснено вимірювання швидкості поверхневих хвиль в сталених зразках. Також виміряна швидкість в цих зразках з допомогою лазерної ультразвукової технології для апробації нового методу. Показано ефективність використання запропонованої методики. Бібліогр. 12, рис. 5.

Ключові слова: поверхневі акустичні хвилі, вимірювання швидкості, перетворювач

Швидкість акустичних хвиль визначається пружними властивостями матеріалу та його густиною [1]. Ці величини залежать від різноманітних чинників: фазового складу, дефектності структури, рівня механічних напружень тощо [2]. Оскільки вимірювання швидкості акустичних хвиль неруйнівні, то це відкриває перспективи розвитку неруйнвної діагностики стану металу відповідальних конструкцій для їх моніторингу впродовж тривалої експлуатації, особливо за умови вичерпання планового ресурсу. В металах зміну величини швидкості можуть викликати різноманітні процеси, а саме: зварювання [3], наклеп [4], гартування [2], пластична деформація [5], в тому числі біля вершини тріщини [6] тощо.

Вимірювання швидкості акустичних хвиль як засобу контролю стану металу є важливим завданням, яке має свої особливості. Одна з них полягає у малих значеннях змін швидкості під дією різних чинників. Як правило, величина зміни швидкості становить менше кількох відсотків, що вимагає високої точності вимірювань. Також часто зміни швидкості акустичних хвиль мають просторово неоднорідний характер, що зумовлює потребу в методиках, які дозволяють проводити вимірювання з високим розділенням. Серед різних типів пружних хвиль перспективними з точки зору використання в неруйнвному контролі є поверхневі акустичні хвилі (ПАХ) [2, 7]. Їх використання дозволяє відносно просто вибирати і неперервно змінювати зону вимірювань, яка визначається положенням перетворювача. Також відзначимо можливість локалізуванню області вимірювань за товщиною зразка матеріалу, оскільки глибина проникнення ПАХ задається її частотою, що дозволяє досліджувати об'єкти із шаруватою структурою [7]. Разом з тим зауважимо, що використання ПАХ для неруйнвного контролю обмежується лише поверхневими шарами об'єкту.

В даний час існують ефективні методики вимірювання швидкості ПАХ [8, 9], які дозволяють вирішувати певні завдання неруйнвного контролю. Проте розвиток техніки, впровадження нових матеріалів і умов їх експлуатації вимагає створення сучасних методів оцінки їх стану, в тому числі з використанням ПАХ. Тому важливим завданням є розвиток методик вимірювання їх швидкості.

Цей процес полягає у вимірюванні часу проходження акустичною хвилею певної відстані, а також визначенні її значення. Оскільки точність вимірювання швидкості часто необхідна досить висока, то і вимірювання цих величин необхідно провести з високою точністю. Сучасні методики та обладнання дозволяють виміряти час проходження акустичного сигналу з достатньою точністю. Точне вимірювання відстані, яку пройшла акустична хвиля, є більш складним завданням. Для його вирішення часто використовують оптичні методи. Інший шлях полягає у використанні контактної перетворювача, в якому приймальна та збуджуючі частини є жорстко з'єднані між собою, як показано на рис. 1 [2].

ПАХ збуджується за допомогою призми, в якій повздовжня акустична хвиля падає під кутом до поверхні об'єкту контролю. Після проходження по поверхні об'єкту контролю відбувається перетворення ПАХ в об'ємну хвилю та її прийом за допомогою п'єзоелектричного приймача. Відстань між приймальною та передаючою призмами, яку проходить ПАХ, є незмінною, що виключає необ-

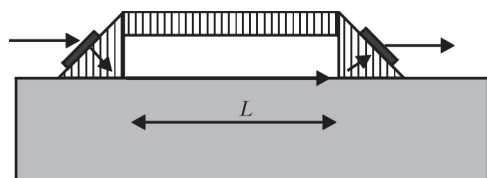


Рис. 1. Схема перетворювача з жорстким з'єднанням (L – база перетворювача)

хідність її вимірювання. Її можна визначити, про-калібрувавши перетворювач за допомогою зразка з відомою швидкістю поширення ПАХ. Разом з тим, калібрування перетворювача вимагає певних затрат часу, а також наявності зразків із відомою швидкістю поширення ПАХ. Розглянемо просту методику вимірювання швидкості ПАХ в одному зразку матеріалу відносно швидкості в іншому зразку, яка може бути реалізована за допомогою некаліброваного перетворювача.

Методика вимірювання швидкості ПАХ. Нехай вимірювання розподілу швидкості ПАХ відбувається вздовж прямої, напрям якої співпадає з напрямком поширення хвилі. В цьому випадку можна визначити розподіл швидкості ПАХ, пересуваючи послідовно перетворювач в напрямку цієї прямої та вимірюючи затримку часу проходження хвилі для кожного положення. Важливою характеристикою цих вимірювань є відстань, на яку пересувається перетворювач. Розглянемо випадок, коли переміщення перетворювача відбувається на крок X , який менший за базу вимірювання (рис. 2). Як показано в праці [10], швидкості ПАХ в ділянках, на які змістився перетворювач, пов'язані виразом:

$$V_1 = \frac{V_0}{\frac{t_1 - t_0}{X} V_0 + 1}, \quad (1)$$

де V_1 – швидкість ПАХ в новій ділянці довжиною X , на яку змістився перетворювач; V_0 – швидкість ПАХ в початковій ділянці, з якої змістився перетворювач; t_0 – час проходження ПАХ через перетворювач в положенні «0»; t_1 – час проходження ПАХ через перетворювач в положенні «1». Вираз (1) дозволяє визначити зміну швидкості $\Delta V = V_1 - V_0$ для певних ділянок об'єкту контролю і також відносну зміну швидкості $\Delta V/V_0$. Такі вимірювання особливо зручно проводити у випадку, коли в об'єкті контролю існує ділянка, в якій швидкість є іншою і розмір ділянки менший за розмір бази перетворювача. Особливістю цих вимірювань є те, що перетворювач не потрібно калібрувати. Як видно з виразу (1), для визначення швидкості в новій ділянці необхідно виміряти різницю часів проходження акустичної хвилі в двох положеннях перетворювача та величину кроку X , на яку його зміщено. Важливо оцінити вплив похибки вимірювання

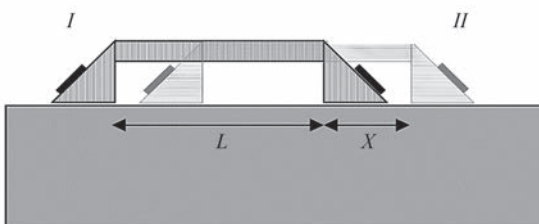


Рис. 2. Схема вимірювань за переміщення перетворювача на величину, меншу за базу вимірювань: I – положення «0»; II – «1»

кроку на точність визначення швидкості ПАХ, оскільки необхідність вимірювати його з високою точністю серйозно може ускладнити вимірювання та, відповідно, зробить методику неефективною. Стандартне відхилення визначення швидкості V_1 , яка спричинена похибкою вимірювання величини зміщення X , буде:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} = \frac{1}{V_1} \frac{\partial V_1}{\partial X} \delta X, \quad (2)$$

де δX – похибка визначення величини зміщення перетворювача.

Можна, виходячи з (1) та (2), отримати:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} = \frac{1}{V_1} \frac{V_0^2}{\left(\frac{t_1 - t_0}{X} V_0 + 1\right)^2} \frac{t_1 - t_0}{X^2} \delta X \quad (3)$$

і відповідно:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} = \frac{t_1 - t_0}{t_{X1}} \frac{\delta X}{X}, \quad (4)$$

де $t_{X1} = X/V_1$ – час проходження ПАХ через нову ділянку на яку змістився перетворювач.

Як видно з цього виразу, похибка визначення швидкості визначається як похибкою визначення зміщення X , так і величиною $\frac{t_1 - t_0}{t_{X1}}$. На практи-

ці в більшості випадків зміна швидкості ПАХ під впливом різноманітних факторів становить менше кількох відсотків. В цьому випадку $\frac{t_1 - t_0}{t_{X1}} \ll 1$

і тому, згідно з (4) похибка визначення величини X спричинить суттєво меншу похибку визначення швидкості V .

Цей висновок є важливим, оскільки дозволяє проводити вимірювання зміщення перетворювача з невисокою точністю. Наприклад, якщо час проходження акустичної хвилі за переміщення перетворювача змінюється на 10^{-2} , то похибка визначення величини переміщення спричинить в 100 разів меншу похибку визначення швидкості ПАХ. Це суттєво спрощує вимірювання, оскільки високоточні вимірювання швидкості можна проводити, використовуючи достатньо прості засоби вимірювання відстані. Таким чином, запропонована методика може бути ефективною, оскільки не вимагає прецизійного вимірювання відстані та, з іншого боку, перетворювач не потрібно калібрувати. Область застосування цього підходу може полягати як у дослідженні просторових неоднорідностей швидкості в різноманітних об'єктах, так і в створенні зразків матеріалів для калібрування перетворювачів.

Експериментальні дослідження методики вимірювання швидкості ПАХ. Схема експери-

менту, яка дозволяє визначити швидкість в зразку за допомогою методики, в якій використовується некалібрований перетворювач показана на рис. 3. Два зразки склеюються між собою так, щоб їхні поверхні, по яких поширюється ПАХ, співпадали. Перетворювач розміщують так, щоб його випромінююча призма контактувала з одним зразком, а приймальна – з іншим. Відповідно ПАХ збуджується на поверхні зразка порівняння, проходить акустичний контакт на границі зразків та приймається приймальною призмою на поверхні досліджуваного зразка. Сумарна затримка ПАХ складається із часу проходження по зразку порівняння, досліджуваному зразку та шару склейки перетворювача до зразка. Приймаємо, що час проходження місця склейки є незмінний в процесі вимірювань. Для вимірювання швидкості в досліджуваному зразку необхідно визначити часи поширення ПАХ через перетворювач t_0 та t_1 в двох різних його положеннях із зміщенням на величину кроку X . Згідно з виразом (1) на основі даних та величини зміщення X можна визначити швидкість в досліджуваному зразку.

Для перевірки даної методики були виготовлені сталеві зразки розмірами $50 \times 10 \times 15$ мм³ з різними швидкостями поширення ПАХ. Напрямо поширення ПАХ співпадав з довгим ребром зразка. Відповідно зразки з різною швидкістю склеювались так, що загальний розмір склеєних зразків становив $100 \times 10 \times 15$ мм³. Внаслідок акустичного контакту ПАХ проходила з одного зразка в інший. Для реалізації методики вимірювання створено перетворювач (рис. 1) з ідентичними приймальною та збуджуючими призмами, виготовленими з оргскла. На відповідні грані призм приклеювали п'єзокераміку з резонансною частотою 2,5 МГц. База перетворювача становила 30 мм. Для збудження перетворювача використовувався промодульований сигнал з генератора тривалістю кілька мікросекунд і частотою заповнення 2,5 МГц.

Після проходження через призми перетворювача та по поверхні зразка сигнал підсилювався та реєструвався за допомогою осцилографа Tektronix TDS 1012, де його порівнювали із опорним сигналом для визначення часової затримки акустичної хвилі. Перетворювач розміщували на склеєних зразках, як показано на рис. 3, в двох різних положеннях, відстань між якими була 20 мм. Вимірю-

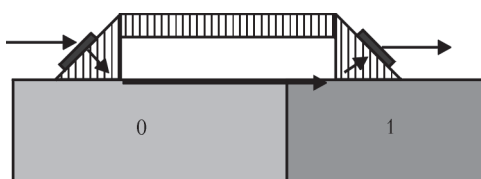


Рис. 3. Схема вимірювань швидкості некаліброваним перетворювачем; 0 – зразок порівняння; 1 – досліджуваний об'єкт контролю

вали різницю часів проходження акустичної хвилі для цих двох положень. Один зразок (№ 1) по чергово з'єднувався з іншими зразками. Визначалась їх швидкість відносно цього зразка. Швидкість ПАХ в цьому зразку визначалась незалежним методом з використанням лазерної техніки.

Лазерні методи вимірювання швидкості дозволяють реєструвати ПАХ в невеликій ділянці зразка, є безконтактними, дозволяють легко змінювати область реєстрації ПАХ [11]. Проте їх застосування обмежується складністю обладнання, яке часто можна застосовувати лише в лабораторних умовах, а також в деяких випадках викликана необхідністю підготовки поверхні об'єкту контролю до вимірювань. Для вимірювання швидкості ПАХ в зразку №1 використовували дефлекційний метод реєстрації цих хвиль [12]. Метод базується на відхиленні відбитого лазерного променя від поверхні зразка в результаті його зміщення під дією акустичної хвилі. Внаслідок періодичного нахилу поверхні відбувається сканування лазерного променя, який періодично зміщується із чутливої ділянки фотоприймача. Таким чином, модулюється інтенсивність лазерного випромінювання, яке падає на фотоприймач. Для збільшення лінійного зміщення скануючого променя фотоприймач розміщували на відстані 70 см від поверхні зразка. Оскільки дефлекційний метод вимагає дзеркального відбитого променя, то поверхня зразка № 1 була відполірована. Схема вимірювальної установки для вимірювання швидкості показана на рис. 4. ПАХ на поверхні зразка 4 збуджували за допомогою контактної призми перетворювача 3 на частоті 2,5 МГц і приймали за допомогою He-Ne лазера THORLABS HRR005 1 з довжиною хвилі випромінювання 0,63 мкм і потужністю 0,5 мВт. В якості фотоприймача 2 використову-

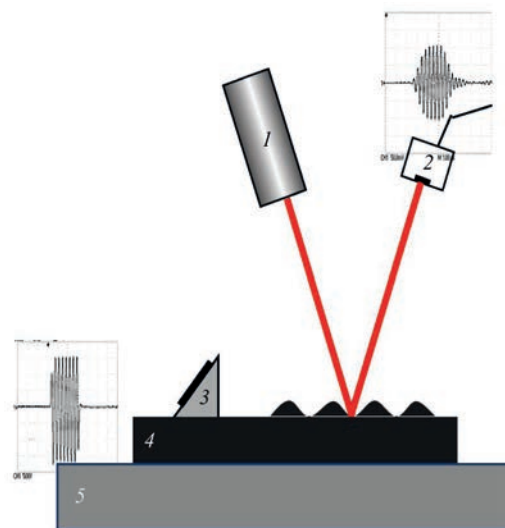


Рис. 4. Схема установки для вимірювання швидкості ПАХ: 1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – призмий перетворювач; 4 – зразок; 5 – мікрометричний столик

вали фотодіод S6468. Після підсилення сигнал з фотоприймача подавали на осцилограф Tektronix TDS 1012, де порівнювали його з опорним сигналом для визначення часової затримки акустичної хвилі. Похибка вимірювання часового зсуву між сигналами становила 2 нс. Для вимірювання відстані між ділянками реєстрації ПАХ використовували мікрометричний столик 5, який дозволяв визначати переміщення зразка з точністю $5 \cdot 10^{-3}$ мм.

Вимірювання швидкості ПАХ в зразку проводили шляхом реєстрації ПАХ в кількох ділянках зразка. Вимірювали відстань між ділянками реєстрації та часовий зсув між ПАХ, прийнятими в різних ділянках і на основі цих даних визначали швидкість. Отримано залежність часового зсуву ПАХ від координати плями лазерного променя та на основі цих вимірювань визначено величину швидкості ПАХ для досліджуваного зразка, яка дорівнює 2966 ± 3 м/с. Похибка визначення швидкості ПАХ лазерним методом визначається в основному похибкою вимірювання відстані між ділянками реєстрації ПАХ.

Отримана величина швидкості ПАХ в зразку № 1 була використана для визначення швидкості в інших зразках запропонованим методом. Часове зміщення за переміщення перетворювача по склесних зразках становило 28 нс для зразків № 1 – № 2 і 44 нс для зразків № 1 – № 3. Відповідні величини розрахованих швидкостей ПАХ за виразом (1) становлять для зразка № 2 – 2953 м/с, для № 3 – 2946 м/с. Для оцінки правильності отриманих результатів вимірювань проведено вимірювання швидкості ПАХ в зразках № 2 та № 3 лазерним дефлекційним методом аналогічно як і для зразка № 1. Для цього ці зразки також були відполіровані та для збудження ПАХ в них використовувався призмий перетворювач (рис. 5), за допомогою якого збуджувались ПАХ частотою 2,5 МГц. Отримані результати становлять для зразка № 2 – 2959 м/с, і для № 3 – 2949 м/с. Таким чином, різниця між результатами вимірювань двома методами становить 0,2 %, що можна вважати задовільним результатом.



Рис. 5. Стальний зразок із призмий перетворювачем: 1 – призмий перетворювач; 2 – пляма зондуючого лазерного променя; 3 – зразок

Висновки

Запропоновано метод вимірювання швидкості ПАХ в металах, який дозволяє за допомогою перетворювача із жорстким з'єднанням передаючої та приймальної частини визначати швидкість в твердих тілах. Методика базується на визначенні швидкості в об'єкті контролю відносно відомої швидкості в зразку порівняння. Особливістю методики є можливість працювати з некаліброваним перетворювачем.

Перевагою запропонованого методу є використання достатньо простого обладнання, оскільки вимірювання відстані можна проводити із невеликою точністю. Порівняно із лазерними методами, методика є простішою, а також підготовка поверхні об'єкту контролю є суттєво простішою.

Проведені вимірювання швидкості ПАХ запропонованим методом і методом з лазерною реєстрацією показали співмірні результати. Тому методика може бути використана для прецизійних вимірювань швидкості акустичних хвиль, а також для створення зразків з відомою швидкістю для калібрування перетворювачів.

Список літератури

1. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій*. Т.1. Київ, Наукова думка.
2. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Новосибирск, Наука.
3. Kumar A., Choudhary B.K., Laha K. et al. (2003) Characterisation of microstructure in 9 % chromium ferritic steels using ultrasonic measurement. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **56**, 483–497.
4. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. (1991) *Акустическая тензометрия (теория и практика)*. Кишинев, Штиинца.
5. Скальський В.Р., Мокрий О.М. (2018) Оцінка пошкодженості феритно-перлітної сталі за величиною зміни швидкості поздовжньої акустичної хвилі. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 3–7.
6. Akhshik S., Ahmadi M. (2006) Ultrasonic Non-destructive evaluation of stress around the tip of a crack. *Asia-Pacific Conference on NDT. Nov. 5–10, 2006*. Auckland, New Zealand, pp. 1–8.
7. Викторов И.А. (1981) *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. Москва, Наука.
8. Gasteau D. et al. (2016) Single crystal elastic constants evaluated with surface acoustic waves generated and detected by lasers within polycrystalline steel samples. *Journal of Applied Physics*, **119**, 043103.
9. Li D., Zhao P., Gunning N. et al. (2014) Measurement of surface acoustic wave velocity using phase shift mask and application on thin film of thermoelectric material. *APS Meeting Abstracts*.
10. Скальський В.Р., Мокрий О.М. (2018) Методика визначення розподілу швидкості поверхневої акустичної хвилі на поверхні сталевого зразка. *Методи та прилади контролю якості*, **1**(40), 22–29.
11. Wagner J.W. (1990) Optical detection of ultrasound in Physical Acoustics. *Ultrasonic Measurement Methods*, V. XIX. Boston, Academic Press.
12. Murfin A.S., Soden R.A.J., Hatrick D., Dewhurst R.J. (2000) Laser-ultrasound detection systems: a comparative study with Rayleigh waves. *Measurement Science and Technology*, **11**, 1208–1219.

References

1. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structure elements*. Vol. 1. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Muraviov, V.V., Zuev, L.B., Komarov, K.L. (1996) *Sound velocity and structure of steels and alloys*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
3. Kumar, A., Choudhary, B.K., Laha, K. et al. (2003) Characterisation of microstructure in 9 % chromium ferritic steels using ultrasonic measurement. *Transact. of the Indian Inst. of Metals*, **56**, 483-497.
4. Bobrenko, V.M., Vangeli, M.S., Kutsenko, A.N. (1981) *Acoustic strain gauge measurement (theory and practice)*. Kishinyov, Shtiintsa [in Russian].
5. Skalskyi, V.R., Mokryy, O.M. (2018) Evaluation of damage level in ferritic-pearlitic steels by the value of the change of longitudinal acoustic wave velocity. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 3–7 [in Ukrainian].
6. Akhshik, S., Ahmadi, M. (2006) Ultrasonic non-destructive evaluation of stress around the tip of a crack. *In: Proc of Asia-Pacific Conf. on NDT. (Nov. 5–10, 2006, Auckland, New Zealand)*, 1–8.
7. Viktorov, I.A. (1981) *Surface acoustic waves in solids*. Moscow, Nauka [in Russian].
8. Gasteau, D. et al. (2016) Single crystal elastic constants evaluated with surface acoustic waves generated and detected by lasers within polycrystalline steel samples. *J. Appl. Phys.*, **119**, 043103.
9. Li, D., Zhao, P., Gunning, N. et al. (2014) Measurement of surface acoustic wave velocity using phase shift mask and application on thin film of thermoelectric material. *APS Meeting Abstracts*.
10. Skalskyi, V.R., Mokryy, O.M. (2018) Procedure for determination of the distribution of surface acoustic wave velocity on steel surface sample. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, **1**(40), 22–29 [in Ukrainian].
11. Wagner, J.W. (1990) *Optical detection of ultrasound in physical acoustics. Ultrasonic Measurement Methods*, Vol. XIX. Boston, Academic Press.
12. Murfin, A.S., Soden, R.A.J., Hatrick, D., Dewhurst, R.J. (2000) Laser-ultrasound detection systems: A comparative study with Rayleigh waves. *Measurement Sci. and Technol.*, **11**, 1208–1219.

НОВАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В.Р. Скальский, О.М. Мокрый, П.П. Великий, П.М. Долишний, Я.Д. Толопко

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.
E-mail: skalsky.v@gmail.com

Рассмотрены особенности измерения скорости поверхностных акустических волн с помощью контактного преобразователя, у которого возбуждающая и приемная части жестко соединены между собой. Предложена новая методика измерения скорости таким преобразователем с использованием образца сравнения. Осуществлено измерение скорости поверхностных волн в стальных образцах. Также измерена скорость в этих образцах с помощью лазерной ультразвуковой технологии для апробации нового метода. Показана эффективность использования предложенной методики. Библиогр. 12, рис. 5.

Ключевые слова: *поверхностные акустические волны, измерения скорости, преобразователь*

NEW PROCEDURE FOR DETERMINATION OF SURFACE ACOUSTIC WAVE VELOCITY

V.R. Skalskyi, O.M. Mokryy, P.P. Velykyi, P.M. Dolishnyi, J.D. Tolopko

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NASU of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.
E-mail: skalsky.v@gmail.com

The paper deals with the features of measurement of the velocity of surface acoustic waves, using a contact transducer, in which the exciting and receiving parts are rigidly coupled. A new procedure is proposed for velocity measurement by such a transducer, using a reference sample. Measurement of surface wave velocity in steel samples was performed. The velocity in these samples was also measured, using laser ultrasonic technology for testing the new method. The effectiveness of the proposed procedure application is shown. 12 Ref. , 5 Fig.

Keywords: *surface acoustic waves: velocity measurement, transducer*

Поступила в редакцию 15.07.2019

Новая книга

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

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



КОМПЛЕКС АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНОГО СТАНА *

А.В. Баглай, А.Н. Гузеев, М.М. Кипин, С.В. Филиппов

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

Динамические нагрузки, возникающие в прокатной клети, в значительной степени зависят от технического состояния узлов и элементов сочленения. Поэтому задача поиска, анализа и исследования взаимосвязей информативных параметров технологических процессов с параметрами вибрационного состояния оборудования имеет первостепенное значение. Библиогр. 5, рис. 9.

Ключевые слова: прокатный стан, техническое состояние оборудования, вибрация, диагностика

Наметившаяся тенденция в металлургической промышленности по применению систем неразрушающего контроля и диагностики технического состояния прокатного оборудования ставит перед разработчиками задачи по внедрению в производство комплексных решений [1].

Цель работы. Система диагностирования должна учитывать режимы работы оборудования и параметры прокатки металла, определять текущее техническое состояние узлов, отслеживать момент начала развития дефекта, прогнозировать состояние клети и выдавать рекомендации по планированию сроков технического обслуживания.

Описание исследования. Прокатный стан А/С 400/215 фирмы «SMS Meer» состоит из четырех групп прокатных клетей: 6 клетей черновой, 6 клетей промежуточной, 6 клетей чистовой, двух чистовых шестиклетевых высокоскоростных блоков. Скорость составляет до 15 м/с на прокатных клетях и 38 м/с на высокоскоростных блоках. Прокатный стан работает в непрерывном режиме с остановками продолжительностью 8...12 ч на планово-предупредительные ремонты оборудования. Захват сляба валками прокатной клети является фактором возмущения, приводящим к формированию переходного колебательного процесса в механизме [2]. Измерения, выполненные на действующем прокатном стане, позволили установить определенные закономерности связей технологического процесса и поведением оборудования во время прокатки. Полученные данные легли в основу разработки математической модели и способов диагностики узлов прокатных клетей. Особое внимание было уделено выбору норм вибрации для данной категории механизмов. Величина общего среднего квадратического значения виброскорости является основным диагностическим параметром, регламентируемым стандартами. При этом стандартов, в которых бы четко прописывались нормы вибрации для металлургического обо-

рудования, нет. Но в действующих стандартах есть примечание, в котором сказано: «Машины специфических производств, особых конструкций и видов могут иметь предельные уровни вибрации, отличающиеся от приведенных в таблицах». Исходя из этого факта и многолетнего опыта диагностирования разнопланового оборудования, для контроля прокатных машин по виброскорости (в диапазоне частот 2–1000 Гц, мм/с, СКЗ) был выбран ГОСТ Р ИСО 10816-3-2002 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью вращения от 120 до 15000 об/мин» [3]. Для контроля редукторов прокатных машин по виброускорению (в диапазоне частот 2–10000 Гц, м/с², СКЗ) был выбран СА 03-001-05 «Стандарт ассоциации. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации» [4]. Для измерения параметров абсолютной вибрации используются пьезоэлектрические акселерометры АС-104-3С с выходом по напряжению (ICP), с коаксиальным антивибрационным кабелем устойчивым к электромагнитным и вибрационным наводкам, датчик надежен в эксплуатации и имеет хорошую амплитудно-частотную характеристику. Крепление датчика, ориентированного в вертикальном направлении, осуществляется винтом к монтажной площадке, что позволяет оперативно снимать и устанавливать его, например, при выполнении ремонтных или поверочных работ (рис. 1).

Каждый измерительный блок комплекса «Корунд» функционирует независимо либо в составе единой системы, с распределенной архитектурой, объединенной с сетью Ethernet. Отдельные блоки комплекса (или вся система в целом), работают автономно, осуществляя необходимые действия по защите оборудования в режиме реального вре-

*В работе принимали участие Никифоров А.Д., Гушин А.Ю., Годунов С.Е.



Рис. 1. Монтаж акселерометров на прокатной клетке-механи, с выводом сигнализации о превышении допустимых уровней контролируемых параметров.

Питание измерительных блоков комплекса осуществляется от двух независимых источников питания +24 В. Для передачи данных имеются: порт RS-485 с поддержкой Modbus RTU и порт Ethernet 10/100 с поддержкой протоколов UDP или TCP/IP.

Программное обеспечение системы представляет собой комплекс программных средств, работающий во взаимодействии с аппаратным модулем СМ-8, предназначенным для оперативной оценки состояния оборудования и выявления вероятных дефектов и неисправностей в процессе эксплуатации [5]. Система диагностирования работает в автоматическом (Сервер АРМ) и интерактивном режиме (режим диалога с оператором – Диагностика АРМ). Диалог с системой осуществляется через систему меню.

Закладка «Состояние», визуализирует вибрационное состояние по виброскорости (2–1000 Гц, мм/с, СКЗ) всех клеток стана одновременно, по группам или по всему стану, за выбранный произвольный

интервал времени: час, сутки, месяц (рис. 2). Световая сигнализация указывает на наличие отклонений (желтый, красный) по уровню вибрации на конкретной клетке стана в определенный период времени. Голубым цветом отмечены клетки, исключенные из технологического процесса, в зависимости от типа прокатываемого сортамента, клетки находящиеся в ремонте или на техническом обслуживании.

Закладка «Текущие» визуализирует вибрационное состояние клеток стана в режиме реального времени (рис. 3, а). Световая сигнализация отображается: на транспаранте для всей клетки (или каскада); отдельно по каждому каналу, по виброскорости согласно стандарту; защитный мониторинг представлен круглым значком – для всей клетки. Результат автоматической диагностики отображается треугольным значком: желтый цвет – средний дефект, красный цвет – сильный дефект.

Выбор группы осуществляется нажатием кнопки «Обзор» в соответствующем окне (черновая, промежуточная, чистовая, высокоскоростная (блок А или В)). Текущие данные представлены как световой сигнализацией, так и сводными таблицами по клеткам выбранной группы (виброскорость, виброускорение, пик-фактор, эксцесс, общий уровень виброускорения в полосах), таблицей допустимых значений, типом проката и режимом работы: прокат/холостой ход. В режиме on-line отображается текущая скорость вращения работающих электродвигателей. Надпись «Нет отметчика» свидетельствует о том, что электродвигатель клетки выключен, однако, система продолжает контролировать фоновый уровень вибрации (виброскорость, виброускорение) на не работаю-



Рис. 2. Закладка «Состояние»

щей клетки. Расчет пик-фактора и эксцесса в этом режиме не выполняется.

Выход из закладки «Группа. Текущие данные» осуществляется нажатием кнопки «Возврат» (рис. 3, б).

На инвертированных клетях, в технологических параметрах дополнительно выводятся сведения о рабочем положении клетки: Горизонтальное или Вертикальное (рис. 4).

Текущие показания вибрационных параметров высокоскоростного блока отображаются числовыми

значениями и световой сигнализацией для каждой кассеты моноблока (рис. 5).

В программе реализован алгоритм контролирующей режим работы прокатной клетки, что позволяет системе диагностировать зубчатые передачи, подшипники качения или скольжения выполняя перекрестный анализ как в режиме холостого хода, так и в режиме прокатки. Для этого выборки временного сигнала разбиваются на равные промежутки времени, а интервал с минимальным от-

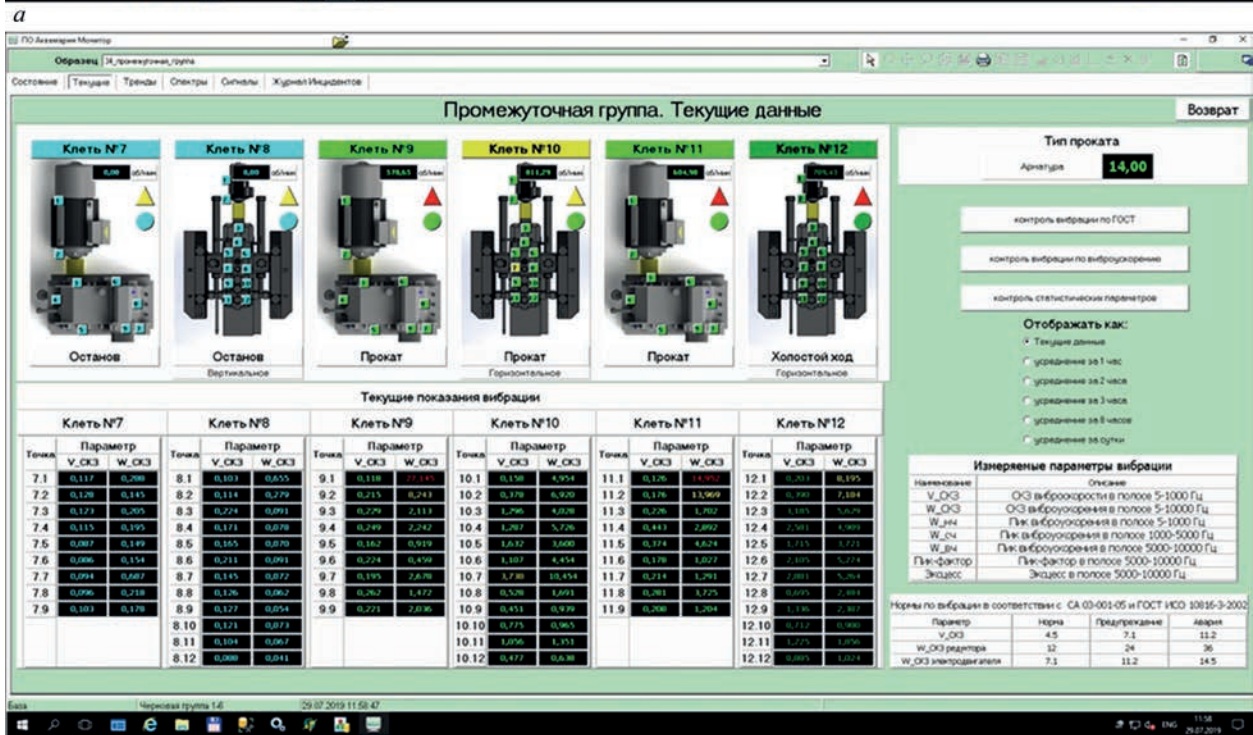
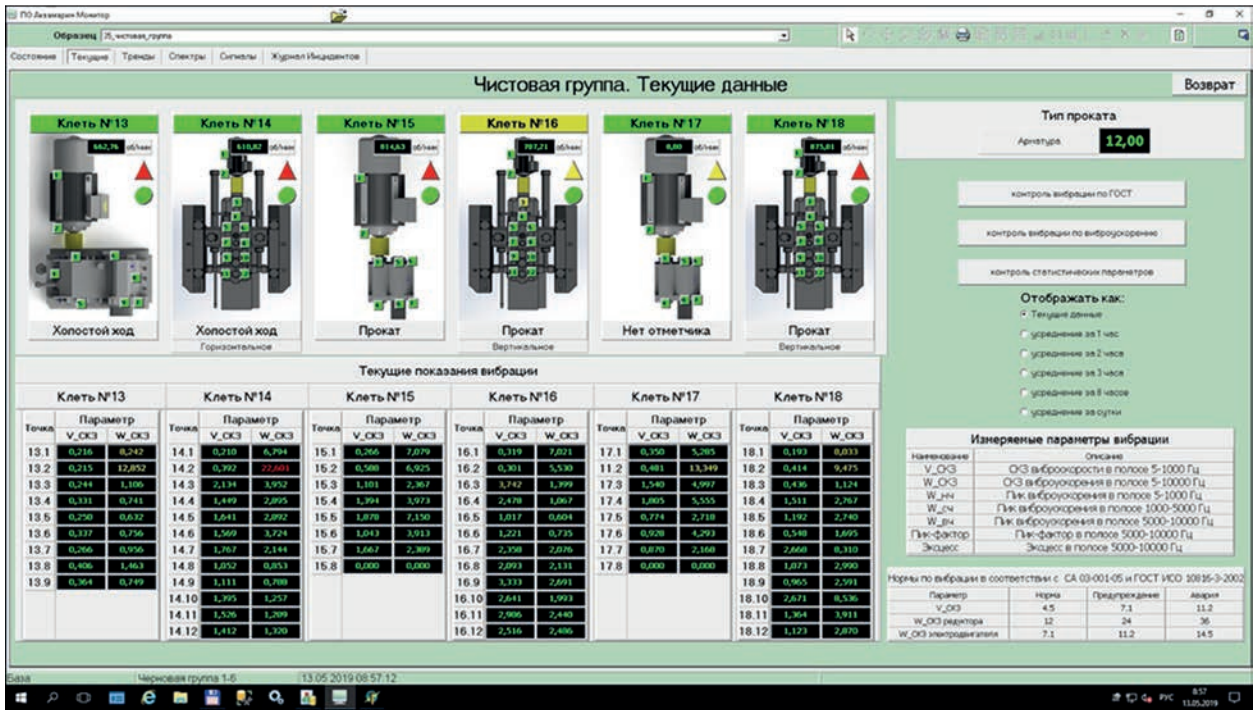


Рис. 3. Закладка «Текущие»: а – выбрать чистовую группу; б – промежуточную

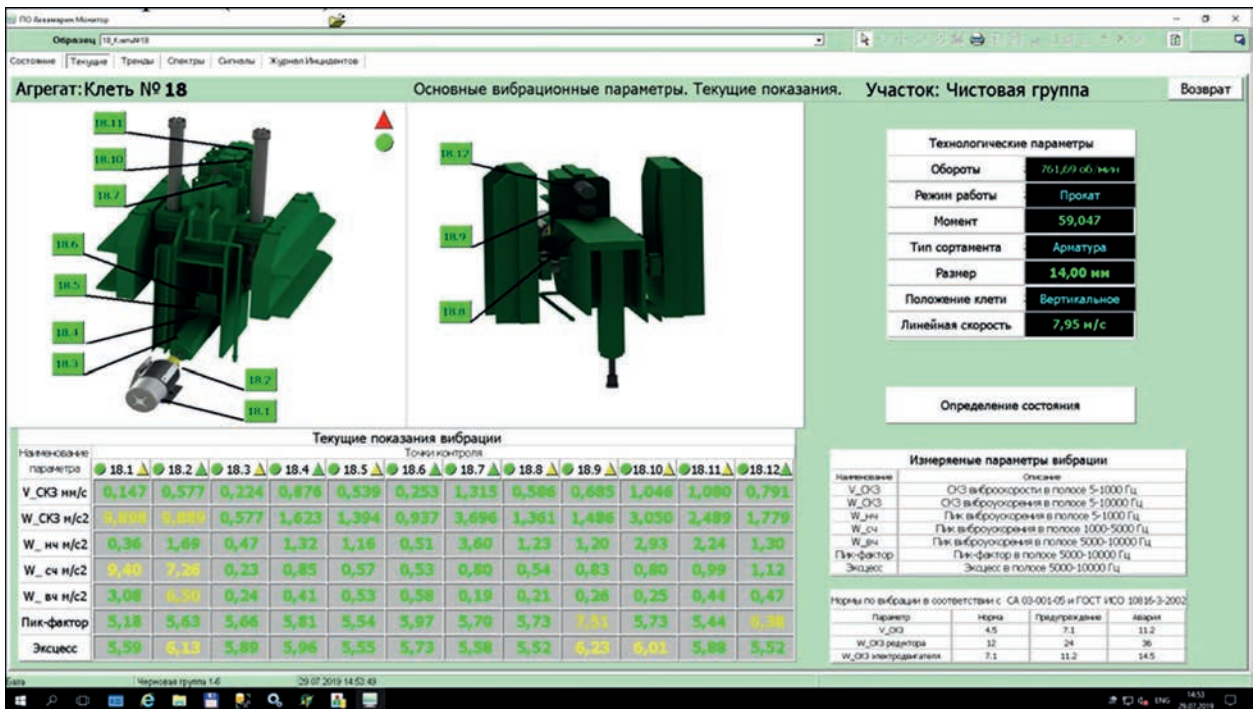


Рис. 4. Закладка «Чистовая группа», выбрать Клеть (например, клеть № 18)

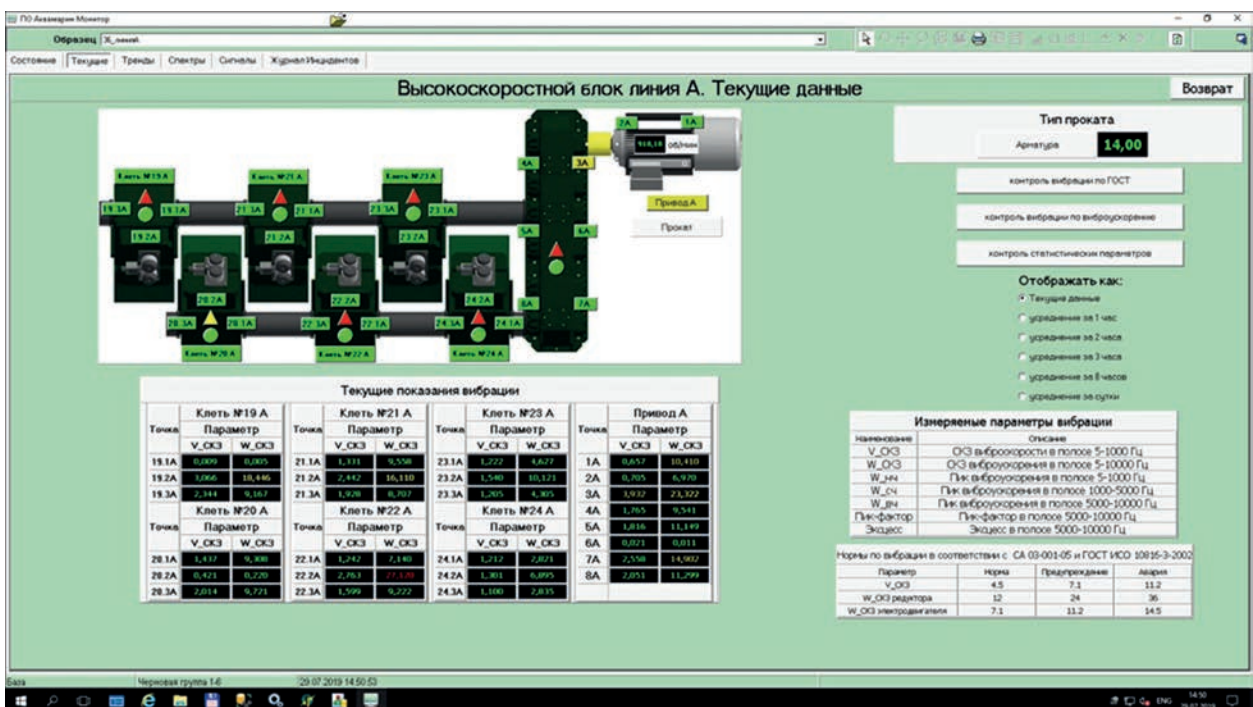


Рис. 5. Закладка «Высокоскоростной блок», выбрать линию А клонением скорости вращения подвергается цифровой обработке сигнала (рис. 6).

Анализ данных в приложении «Сервер АРМ» осуществляется в автоматическом режиме 4 раза в сутки, работает независимо от приложения «Диагностика АРМ». На автоматизированном рабочем месте диагноста можно выбрать любую клеть и выполнить внеочередную проверку нажатием клавиши «Определение состояния». В раскрывшемся приложении «Диагностика АРМ» представлены все диагнозы для выбранной клетки (например,

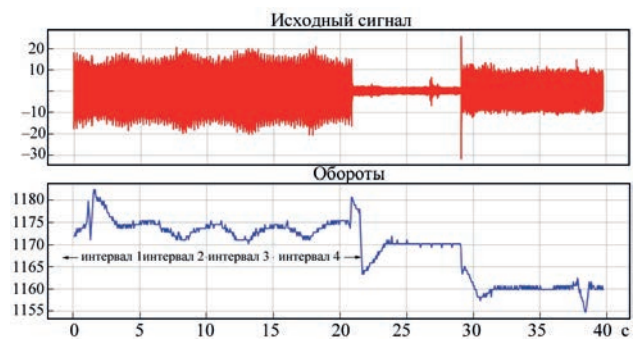


Рис. 6. Регистрация скорости вращения электродвигателя

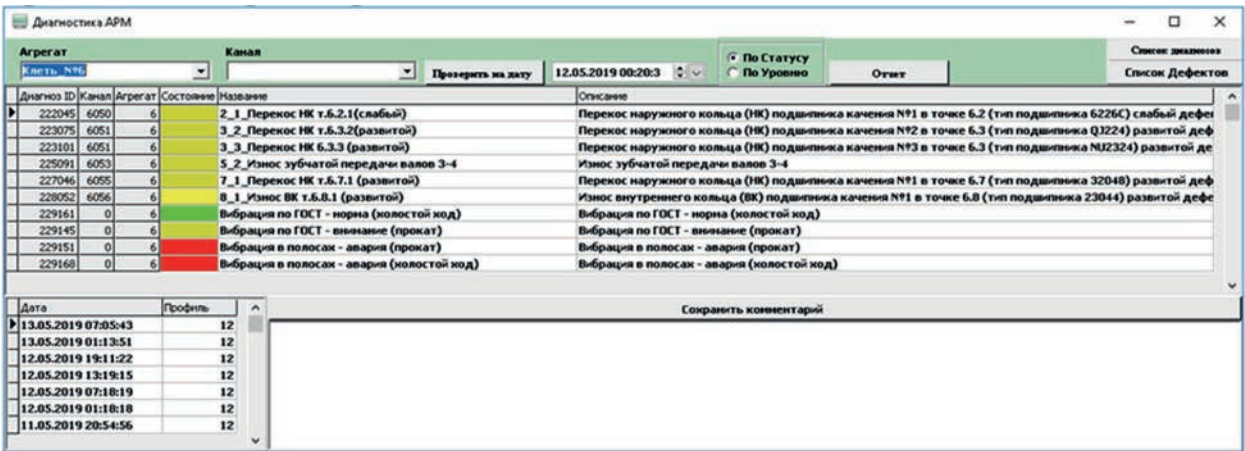


Рис. 7. Приложение «Диагностика АРМ»

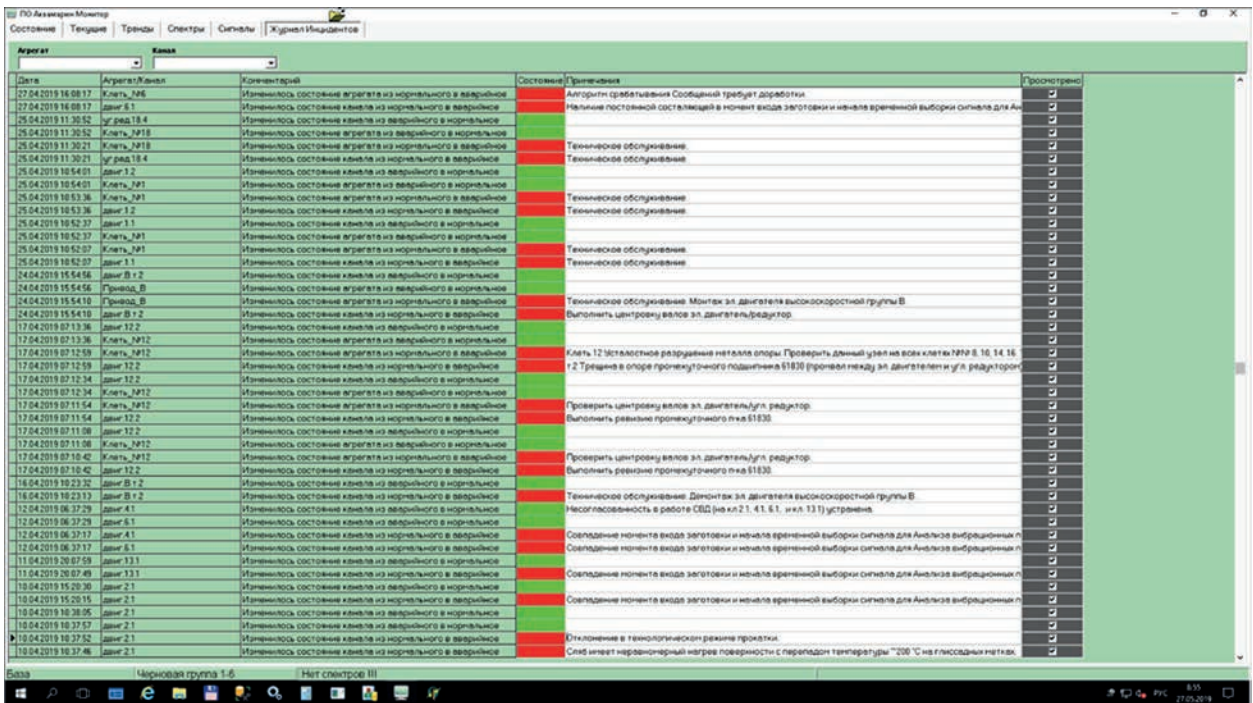


Рис. 8. Закладка «Журнал инцидентов»

клеть 6) выполненные системой за прошедший период времени (рис. 7).

Приведены виды и степень развития обнаруженных дефектов для каждого подшипника и/или зубчатой передачи, а также соответствие уровня вибрации клетки установленным нормативным требованиям как в процессе прокатки, так и в режиме холостого хода. Кнопкой «Отчет» запускается приложение формирующее отчет о текущем техническом состоянии оборудования, с указанием уровней вибрации и обнаруженных дефектов.

В Журнал инцидентов автоматически заносятся все случаи превышения уставок защитного мониторинга (рис. 8). В журнале отображаются данные о времени события, наименование клетки и локализация проблемной точки, комментарий об изменении состояния конкретного канала или агрегата в целом из нормального в аварийное состояние. В примечание вносятся сведения

о причине возникновения инцидента и об объеме выполненных работ по техническому обслуживанию или ремонту оборудования. Текст, вводимый в примечании, может дополняться документами и необходимыми изображениями, по окончании просмотра и/или редактирования инцидента, диагностом ставится отметка в ячейке журнала «Просмотрено».

Полученные результаты. Величина износа отдельных элементов подшипника качения пропорциональна глубине модуляции сигнала на информативной частоте. На кассете высокоскоростного блока стана А/С 400/215, после вывода ее из эксплуатации в плановый ремонт, была выполнена замена всех подшипников. На первоначальном этапе создания системы диагностики, предварительные величины глубины модуляции дефектов подшипника были заданы следующим образом: для слабого дефекта 4,5 %, для сильного дефекта 9 %.

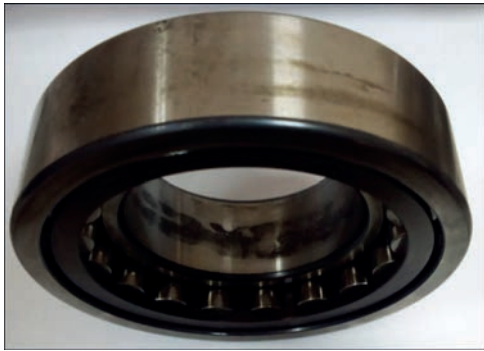


Рис. 9. Состояние подшипника кассеты высокоскоростного блока

По результатам демонтажа подшипников из кассеты моноблока и выполненной ревизии были обнаружены следующие дефекты (рис. 9):

- на контактных поверхностях наблюдаются изменения формы беговых дорожек, что свидетельствует о средней степени развития дефектов;
- слабые дефекты отмечены зеркальными поверхностями беговых дорожек и повышенными зазорами.

Для продления эксплуатационного ресурса подшипников мелкосортного стана, в таблицу степени развития дефектов подшипников качества, были внесены коррективы в сторону увеличения допустимой глубины модуляции.

Структура программного обеспечения имеет открытую архитектуру и может корректироваться под конкретную технологическую задачу.

Эффективная работа диагностического модуля системы «КОРУНД» на стане НТЛС-1680 позволила своевременно обнаружить дефекты на прокатных клетях и оперативно выполнить ремонтные работы без снижения производительности стана. Экономический эффект по результатам превентивного ремонта редук-

торов в ЦГПТЛ за 7 мес. эксплуатации автоматической системы вибродиагностики составил половину стоимости затрат на ее приобретение [5].

Выводы

1. Разработанная система диагностирования применительно к прокатному стану на основе контроля вибрации корпусного оборудования выполняет автоматическую диагностику как в процессе прокатки, так и в режиме холостого хода, определяет состояние подшипников и зубчатых зацеплений редукторов, соединительных муфт и шестеренных клетей.

2. Объективная информация, предоставляемая системой о техническом состоянии оборудования позволяет планировать периоды ремонта и технического обслуживания клетей.

3. Комплексный подход к решению вопроса безопасности производства обеспечивает улучшение условий труда оперативного персонала металлургического комбината, снижению производственного брака и снижения затрат на ремонты оборудования.

Список литературы / References

1. Verenev, V.V., Bolshakov, V.I., Putnoki, A. Yu. et al. (2010) *Dynamic processes in stands of wide-strip mill 1680*. In: Monography. Dnepropetrovsk, IMA-press [in Russian].
2. Verenev, V.V. (2014) *Lowering of dynamic loads and diagnostics of wide-strip mills in transition modes*. Nikopol, SPD Feldman O.O. [in Russian].
3. (2003) GOST R ISO 10816-3-2002: *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Pt 3: Industrial machines with nominal power base above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 1500 r/min when measured in situ*. Moscow, Standartinform [in Russian].
4. (2005) SA 03-001-05: *Association standard. Centrifugal pumping and compressor units of hazardous productions. Service vibration norms*. Moscow, Standartinform [in Russian].
5. Baglai, A.V., Kipin, M.M., Dubina, M.A. (2019) *Vibrational diagnostics of a reducer of wide-band rolling mill 1680*. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 53-57 [in Russian].

КОМПЛЕКС АВТОМАТИЧНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ОБЛАДНАННЯ ПРОКАТНОГО СТАНУ

А.В. Баглай, А.Н. Гузеев, М.М. Кіпін, С.В. Філіппов
ДП «ДІАМЕХ-УКРАЇНА». 61105, м. Харків, вул. Киргизська, 19, АБК-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

Динамічні навантаження, виникаючі у прокатній кліті, в значній мірі залежить від технічного стану вузлів, а також елементів зчленування. Тому задача пошуку, аналізу та дослідження взаємозв'язків інформативних параметрів технологічних процесів із параметрами вібраційного стану обладнання має першорядне значення. Бібліогр. 5, рис. 9.

Ключові слова: прокатний стан, технічний стан обладнання, вібрація, діагностика

COMPLEX FOR AUTOMATIC VIBRATIONAL DIAGNOSTICS OF ROLLING MILL EQUIPMENT

A.V. Baglay, A.N. Guzev, M.M. Kipin, S.V. Filippov
«DIAMECH-UKRAINE». ABK-1, 19 Kyrgyzskaya Str., 61105, Kharkov, Ukraine. E-mail: baglay@diamech.com.ua

Dynamic loads arising in the rolling stand, to a large extent depend on the technical condition of the assemblies and articulation elements. That is why, the task of searching, analyzing and studying the relationships of informative parameters of technological processes with the parameters of vibrational state of the equipment is of paramount importance. 5 Ref., 9 Fig.

Keywords: rolling mill, technical condition of the equipment, vibration, diagnostics

Поступила в редакцию
15.07.2019

ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ ДИМОВИХ ТРУБ ПАСИВНИМ ТЕПЛОВІЗІЙНИМ МЕТОДОМ

В.Ю. Глуховський, О.Г. Бондаренко

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

Виконано аналіз галузей промисловості, в яких отримав розповсюдження пасивний тепловізійний метод контролю для діагностування технічного стану важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів. Розглянуто умови експлуатації найбільш поширених потенційно небезпечних промислових димових труб. Проаналізовано причини утворення та основні типи дефектів та ушкоджень в структурних елементах димових труб. Наведено основні способи оцінки технічного стану димових труб пасивним тепловізійним методом шляхом вирішення прямої задачі дефектоскопії з використанням моделей термограм аномалій температурних полів на зовнішній поверхні димової труби. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: димова труба, пасивний тепловізійний метод контролю, причини утворення несучільностей, способи оцінки технічного стану

Пасивний тепловізійний метод неруйнівного контролю отримав велике розповсюдження в різних галузях промисловості України як метод діагностування технічного стану різноманітних промислових об'єктів. Метод визнано у більшості розвинених країн як ефективний, інформативний та безпечний, а його швидкодія перевищує решту методів неруйнівного контролю та технічного діагностування.

На сьогодні накопичено значний досвід із застосування пасивного тепловізійного контролю в різних галузях промисловості для визначення різноманітних параметрів об'єктів контролю [1]. При пасивному тепловому контролі схеми досліджень промислових об'єктів визначаються, головним чином, можливістю доступу до тієї поверхні об'єкта, на якій дефекти проявляються оптимальним чином. Враховуючи, що формування термографічних зображень температурних полів на поверхні багатьох промислових об'єктів здійснюється в процесі їх функціонування, то з позиції доступності для діагностування їх технічного стану пасивним тепловізійним методом такі об'єкти можна класифікувати як доступні, важкодоступні та потенційно небезпечні. Найбільше таких об'єктів знаходиться в енергетичній промисловості, металургії та машинобудуванні, хімічній та нафтохімічній промисловості, будівництві та комунальному господарстві.

Характерними із доступних об'єктів для кожної з названих галузей промисловості є теплотраси та теплоізоляція теплотрас. До основних доступних об'єктів контролю в цих галузях промисловості, що полягають діагностуванню пасивним тепловізійним методом, відносяться турбоге-

нератори, енергоагрегати та електричні машини різного призначення, електричні підстанції та трансформатори. Дефекти в енергонавантажених вузлах утворюються неперервно, тому за допомогою періодичного тепловізійного діагностування кількість виникаючих і деградуючих дефектів можна підтримувати на деякому мінімальному рівні. Масовими об'єктами контролю в електроенергетиці є контакти закритих та відкритих розподільчих пристроїв електричних підстанцій тощо [2].

В металургійній та машинобудівній галузях промисловості пасивним тепловізійним методом діагностуються різноманітні доступні машини та механізми, валки, бойлери тощо. Особливо важливо застосовувати пасивний тепловізійний метод контролю в хімічній та нафтохімічній промисловості, де контролю підлягають резервуари на предмет рівня теплої рідини в них, цистерни з агресивним середовищем на предмет хімічного спрацьовування стінок тощо. В будівництві контролю пасивним тепловізійним методом підлягають стан огорожувальних конструкцій, теплоізоляція огорожувальних конструкцій, дахи будівель і т. п.

Найважливішу групу об'єктів, що підлягають контролю пасивним тепловізійним методом, складають важкодоступні та потенційно небезпечні об'єкти у наведених галузях промисловості. На рис. 1 наведена спрощена класифікація важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів діагностування пасивним тепловізійним методом їх технічного стану в різних галузях промисловості.

Серед важкодоступних і потенційно небезпечних об'єктів, що підлягають дистанційному діагностуванню пасивним тепловізійним методом в енергетиці, можна виділити протяжні лінії



Рис. 1. Спрощена класифікація важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів діагностування пасивним тепловізійним методом їх технічного стану в різних галузях промисловості електропередач та порцелянові ізолятори високовольтних ліній. Для отримання термограм температурних полів цих об'єктів використовувались гелікоптери [1]. На сьогоднішній день обліт ліній електропередач запропоновано здійснювати за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а для тепловізійної зйомки опор з ізоляторами, відповідно, мультикоптери [3].

Значна частина важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів є й в інших галузях промисловості: металургійні печі, футерівка печей і розливних ковшів, гарячий прокат; в хімічній промисловості – хімічні реактори та їх футерівка; в будівництві – огорожувальні конструкції, втрати тепла будівлями та спорудами тощо.

Найбільшу групу важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів у названих галузях промисловості займають димові труби різного призначення, а також інші промислові газоходи, в тому числі й вентиляційні, які є невід'ємною частиною технічних схем промислових підприємств, теплоенергоцентралей (ТЕЦ) та теплових електростанцій (ТЕС).

Нижче буде розглянуто основні умови експлуатації та характеристики димових труб і особливостей діагностування їх технічного стану пасивним тепловізійним методом.

Умови експлуатації димових труб. Димові труби, призначення яких є відведення газів від теплових установок та розсіювання їх в атмосфері, відносяться до складних і дорогіших висотних інженерних споруд баштового типу, є кінцевою ланкою багатьох важливих технологічних процесів, вихід яких з експлуатації, як правило, призводить до зупинки всього виробництва, що несе за собою великі фінансові втрати. Тому від надійності, міцності та довговічності цих споруд залежить безперебійна робота під'єданого до них обладнання та агрегатів, забезпечення

тепло- та електроенергією як окремих промислових підприємств, так і цілих регіонів.

Під час експлуатації димові труби зазнають не лише значних вітрових та температурних навантажень, а й вплив агресивних високотемпературних газів, що рухаються стволем труби зі значною швидкістю. Первісно труби різного призначення слугували лише для створення тяги, яка забезпечувала потрібний режим горіння або вентиляції, що дозволяло обмежуватись трубами малої висоти. В подальшому з розвитком промисловості виникли жорсткіші вимоги щодо захисту навколишнього середовища від викидів у атмосферу шкідливих промислових відходів. Для зменшення негативних впливів димових та вентиляційних газів на стан повітряного басейну почали використовувати відведення попередньо очищених газів від виробничих підприємств на значну висоту. Це дозволило розсіювати їх на значну висоту й тим самим знизити концентрацію до безпечного рівня. На даний час в Україні на промислових підприємствах експлуатується понад 3000 димових труб висотою понад 100 м. Визначення технічного стану димових труб, що знаходяться в експлуатації, дозволяє прогнозувати період їх безвідмовної роботи, визначення об'єму та місця проведення ремонту, оцінити якість ремонтних робіт.

Саме тому пасивний тепловізійний метод ще на початку 1980-х рр. став одним з основних методів неруйнівного контролю багатьох важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів, таких як димові труби, в різних галузях промисловості з метою діагностування технічного стану [4].

Причини утворення та основні типи дефектів та ушкоджень димових труб. В залежності від конструктивних особливостей димові труби під-розділяють на [5]:

- цегляні, з футерівкою з глиняної цегли, вогнетривких або кислотостійких матеріалів;
- монолітні залізобетонні з притиснутою футерівкою з глиняної цегли та кислототривких виробів, з футерівкою та вентиляційними проміжками, з внутрішнім стовбуром або декількома внутрішніми стовбурами;
- збірні залізобетонні, з футерівкою або без неї;
- металічні, вільно розташовані або на розтяжках, футеровані або з внутрішніми стовбурами.

Як показує світова практика, саме для діагностування технічного стану наведених димових труб широко застосовується пасивний тепловізійний метод. Нижче розглянемо причини утворення та основні типи дефектів цегляних та залізобетонних димових труб. Саме димові труби об'єктів енергетики, металургії, хімічної та нафтохімічної промисловості, будівництва та комунальних господарств в своїй більшості виконані або виконуються цегляними чи залізобетонними.

Конструктивно цегляні димові труби виконуються з:

- цегляною футерівкою та теплоізоляцією в нижній частині труби;
- цегляною футерівкою по всій висоті стовбура труби та теплоізоляцією в нижній частині стовбура й повітряним вентиляльованим проміжком;
- кислотостійкою цегляною футерівкою та теплоізоляцією по всій висоті труби.

Серед залізобетонних димових труб щодо їх конструктивного виконання виділимо такі:

- з футерівкою з глиняної цегли, з частковою теплоізоляцією і повітряним не вентиляльованим каналом;
- з футерівкою з глиняної цегли, теплоізоляцією з мінеральних матів або напівжорстких плит та притисною стінкою;
- з футерівкою з кислотостійкої цегли, мінеральною ізоляцією, притисною стінкою та не вентиляльованим каналом.

Таким чином, за конструктивними особливостями наведені димові труби виконуються з тришаровими стінками, які складаються з шару футерівки, шару теплоізоляції та власне шару самого стовбура труби із цегли або залізобетону. В процесі експлуатації димових труб руйнування будь-якого з наведених шарів призведе до виникнення аномалій температурного поля на їх зовнішній поверхні. Саме внутрішні дефекти у шарах димових труб можуть бути виявлені тільки в тих межах, які вносять збудження в поле температур на їх поверхні.

Виникнення дефектів в шарах димових труб пояснюється особливо складними умовами, в яких вони працюють. Температурні перепади, колювання тиску, зміна вологості, агресивний вплив

димових газів, вітрові навантаження та навантаження від власної маси, ось не повний перелік факторів, що призводять до виникнення дефектів в тілі стінки труби в процесі її експлуатації. Конструктивні елементи труб одночасно зазнають різноманітних видів корозії, ерозії, температурних напружень, статичних й динамічних навантажень.

Конструкції димових труб контактують з атмосферою й тому зазнають різноманітних фізико-хімічних впливів. Джерелом цих впливів є різні типи атмосферних опадів, високошвидкісні тверді частинки, газоподібні компоненти та аерозолі, які містяться в атмосфері, сонячна радіація, повітряний тиск, різночастотні періодичні коливання температури навколишнього повітря та коливання його вологості та інші характеристики. В реальних умовах властивості матеріалів, які складають конструкцію димової труби, можуть значно відрізнятись під дією температури та вологості повітря, агресивного впливу атмосферних газів, а також замерзання та танення, що не рідко призводить до утворення тріщин у стовбурі труби.

В процесі експлуатації димових труб відбувається накопичування дефектів і пошкоджень у шарах матеріалів димової труби, які утворюються в основному внаслідок вітрового впливу, агресивних компонентів робочого середовища, високотемпературних впливів як від відпрацьованих димових газів, так і під дією сонячної радіації в процесі однобічного опромінення.

На рис. 2 наведена спрощена класифікація дефектів стовбурів цегляних та залізобетонних димових труб.

Основним недоліком експлуатації димових труб різного призначення, є їх робота в непроєктованому режимі. За останні роки внаслідок спаду промислових виробництв значна частина підприємств змушена працювати з незавантаженими виробництвами. Димові труби, які розраховані на відведення газів від теплотехнічних агрегатів при їх повноцінному навантаженні, зазнають посилене спрацьовування внаслідок зменшення об'ємів відпрацьованих газів, зменшення їх температури, нестаціонарних навантажень й зміни видів палива. Остання проблема стоїть особливо жорстко на підприємствах енергетичного комплексу, коли замість природного газу спалюють вугільний пил, мазут та інші «важкі» вуглеводні. Робота димової труби з режимами навантаження, відмінних від первинно встановлених, збільшує ймовірність корозії при низьких температурах навколишнього повітря.

В процесі експлуатації димових труб різних типів виникають дефекти та ушкодження також у решті внутрішніх шарів труб: футерівці, теплоізоляції та паровологоізоляції. На рис. 3 наведена

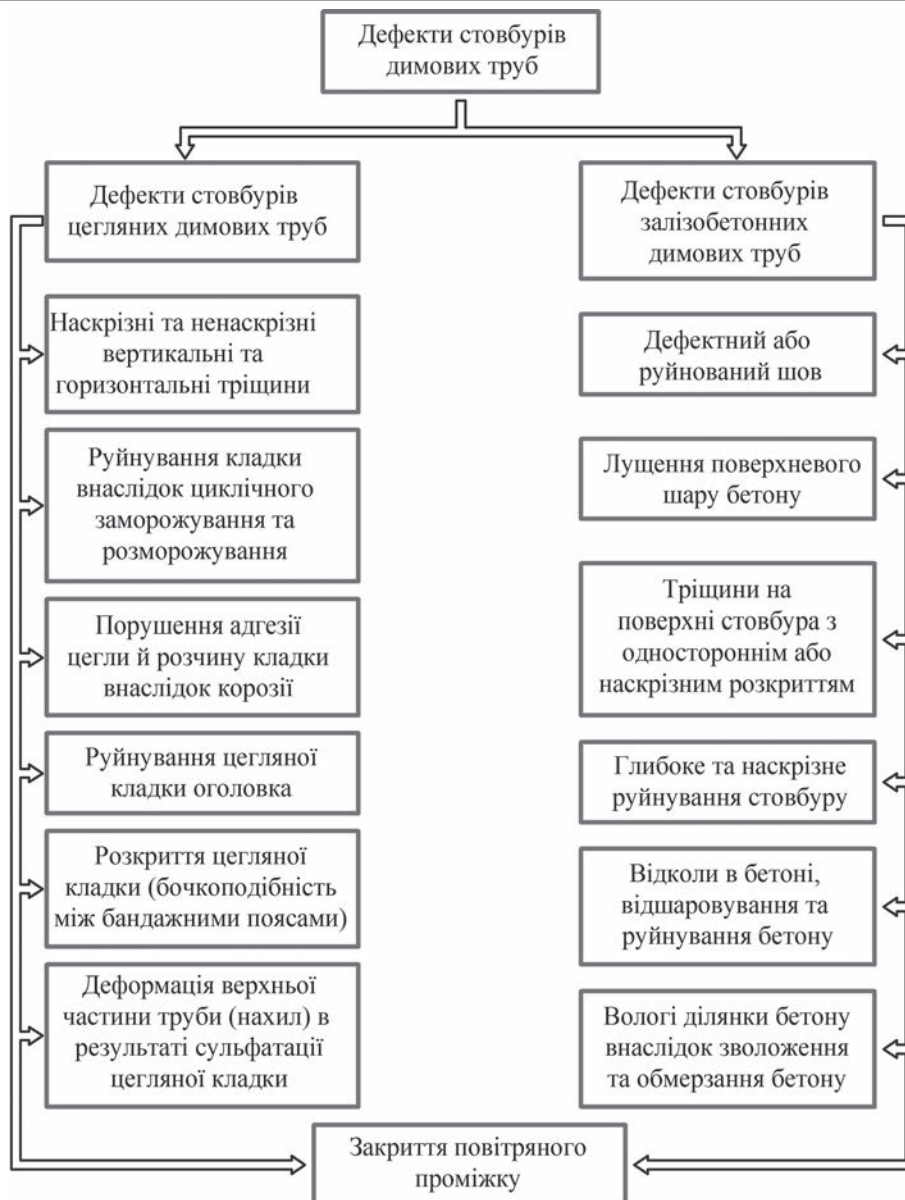


Рис. 2. Спрощена класифікація дефектів стовбурів цегляних та залізобетонних димових труб

спрощена класифікація дефектів та ушкоджень футерівки та ізоляції димових труб.

В якості прикладу на рис. 4 наведена кількість металевих димових труб у відсотках із загальної вибірки, в яких виявлені дефекти та ушкодження футерівки різних типів [6].

Основними типами дефектів та ушкоджень футерівки металевих димових труб є:

- 1 – вертикальні та похилі тріщини в футерівці;
- 2 – локальні руйнування футерівки та випадіння окремих цеглин;
- 3 – пучення цегляної кладки футерівки та теплоізоляції труби;
- 4 – пошкодження або відсутність ізоляції;
- 5 – пошкодження сльозників уступів;
- 6 – проміжки між ланками футерівки.

Більшість наведених дефектів і ушкоджень футерівки металевих труб характерні також і для цегляних та залізобетонних димових труб.

Важливо зазначити, що значна кількість підприємств наведених галузей промисловості в Україні побудовані за часів інтенсивного розвитку промисловості (1950–80-ті рр.) і експлуатуються тривалий період, аж до останнього часу. Більшість димових труб цих підприємств також знаходиться в експлуатації протягом 50–70-ти років, при розрахованому терміні експлуатації в 50 років. По мірі збільшення строку їх експлуатації вже гостріше постає питання забезпечення надійності та довговічності зазначених об'єктів. А тим часом на сьогоднішній день на різних підприємствах нашої держави, як вже раніше зазначалось, експлуатується більш ніж 3000 різноманітних типів димових та вентиляційних труб та газоходів.

При утворенні в шарах футерівки, теплоізоляції та стовбурі труби суттєвих дефектів та ушкоджень відбувається інтенсифікація руйнування несучого стовбура димової труби. Це може при-



Рис. 3. Спрощена класифікація дефектів та uszkodжень футерівки та ізоляції димових труб

зводити до тяжких наслідків для технологічного обладнання та працюючого персоналу, життєзабезпечення населення та забруднення навколишньої території та виведення з експлуатації життєво важливих виробництв. Тому гостро постає питання про надійність та довговічність висотних інженерних споруд таких як промислові димові труби різних типів.

Саме оцінка технічного стану димових труб після тривалих термінів експлуатації та прогнозування їх залишкового ресурсу є дуже актуальною задачею. Водночас багато димових труб в сучасних умовах експлуатуються з порушенням проектних умов та без належного контролю їх технічного стану. А якщо контроль і виконується, то труби мають бути виведені з експлуатації на час їх діагностування. Вартість, тривалість та якість ремонту напряму залежить від своєчасного виявлення дефектів, що впливають на працездатність димової труби та діагностування технічного стану.

Як показав досвід різних країн світу, вирішити задачу діагностування технічного стану димових труб та інших важкодоступних і потенційно небезпечних об'єктів в сучасних умовах може діагностична технологія пасивного тепловізійного методу. Своєчасне проведення тепловізійного обстеження димових труб, що не вимагає зупинки виробничих процесів, дозволить на ранніх стадіях виявити дефекти і uszkodження труби та прогнозу-

вати їх розвиток. Аналіз виявлених дефектів дозволяє проводити подальше повне інструментальне обстеження димової труби на локальних ділянках, що уможливорює зниження витрат в порівнянні з повним обстеженням технічного стану димової труби без проведення тепловізійного діагностування її технічного стану. А своєчасний ремонт дозволить експлуатувати димові труби без аварійних ситуацій та зупинок технологічних процесів.

Способи оцінки технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом. Технічному стану димових труб завжди приділяли особливу увагу з самого початку їх введення в експлуатацію, що пояснюється їх безпосереднім впливом на працездатність та економічність функціонування великої кількості різноманітних енергетичних установок та агрегатів у різних галузях промисловості не лише України. Так, виведення

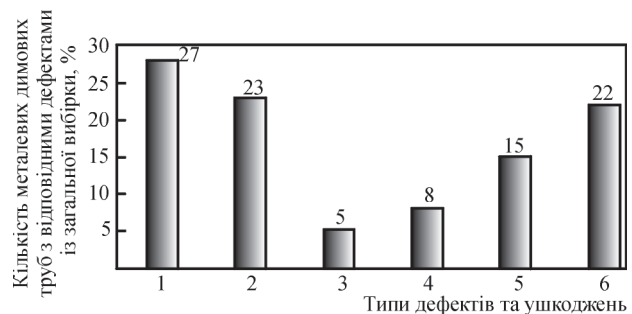


Рис. 4. Ушкодженість футерівки металевих димових труб (опис 1–6 див. у тексті)

димової труби в непередбачений ремонт на ТЕС призводив до обмеження їх потужностей на період, який залежав від характеру дефекта труби. Тому спостереження за технологічним станом димових труб було організовано так, щоб виключити руйнування та різноманітні ушкодження аварійного характеру, які могли викликати необхідність відключення котлів ТЕС, під'єднаних до димової труби.

Довгий період отримання інформації про технічний стан димової труби був пов'язаний з необхідністю обов'язкової зупинки котлів ТЕС для обстеження стовбура (футерівки) зі сторони димових газів, що вимагало виготовлення та монтажу відповідного оснащення для внутрішнього огляду та великої трудомісткості даних робіт. Разом з тим відомо, що деякі ТЕЦ обслуговують підприємства з неперервним технологічним процесом, і тому для обстеження димових труб необхідно, заздалегідь, до зупинки виробництва, передбачити заходи щодо забезпечення робочого процесу виробництва, що також пов'язано з додатковими витратами трудових та матеріальних ресурсів. При цьому часто організовані з великими труднощами внутрішні обстеження труб не давали додаткової інформації, а лише дозволяли встановити факт можливості подальшої роботи димової труби.

У зв'язку з наведеними недоліками методів обстеження димових труб для оцінки їх технічного стану розроблялися альтернативні методи, які дозволяли отримувати інформацію про характеристики надійності їх експлуатації. В основу цих методів було покладено принцип дистанційності. Вперше дистанційний метод було використано для контролю експлуатаційних режимів димових залізобетонних труб з протитиском [7]. За допомогою розробленої системи контролю, яка здійснювала вимірювання температури та статичних тисків газів і повітря у проміжку, використовувалося регулювання основних експлуатаційних параметрів надійності (протитиску та температурного перепаду в футерівці) димової труби. Контроль технічного стану труби здійснювався за значенням коефіцієнту фільтрації футерівки. Постійний контроль за припустимими температурними перепадами на футерівці забезпечував її тріщиностійкість, а задоволення вимоги зі створення протитиску у вентиляційному каналі виключно фільтрацією та дифузиею димових газів до залізобетонного стовбуру труби забезпечувало його від корозії.

Недоліки наведеного для всіх типів конструкцій димових труб традиційного контролю їх технічного стану очевидні внаслідок необхідності обов'язкового виключення котлогенераторів для візуального обстеження внутрішньої поверхні стовбура труби з підвісної люльки.

Тому справжня революція у розвитку методів контролю димових труб була здійснена після впровадження в практику пасивного теплового дистанційного методу на основі інфрачервоної техніки (тепловізорів). Початок практичного застосування дистанційного вимірювання (контролю) температури шляхом реєстрації теплового випромінювання, що отримало назву термографія (або теплобачення), відноситься до 1960-х рр., коли на ринку технічних засобів з'явилися тепловізори шведської фірми AGA (потім AGEMA Infrared systems). В першу чергу термографічні обстеження були застосовані для контролю та діагностування виробів у електротехніці, радіоелектроніці, ракетобудуванні [4]. Саме тепловізійний метод, що базується на основних законах теплового випромінювання, встановлює зв'язок між температурою поверхні тіла, його енергією випромінювання та випромінювальною здатністю об'єктів, що випромінюють, та навколишнім середовищем.

Основними перевагами пасивного тепловізійного методу контролю промислових об'єктів є наступні:

- дистанційність вимірювання аномалій температурного поля;
- одностороння доступність до об'єкта;
- оперативність контролю, тобто швидкість огляду поверхні об'єкта (висока продуктивність ведення контролю);
- можливість проведення контролю об'єкта без виведення його з експлуатації;
- можливість інтерпретації внутрішніх глибинних дефектів за вимірними аномаліями температурних полів на поверхні об'єкта;
- високопросторова та високотемпературна роздільна здатність тепловізорів;
- великий діапазон вимірювальних температур об'єктів контролю;
- можливість огляду тепловізором малих (декілька см) і дуже великих (до сотень метрів) поверхонь об'єктів;
- безпека ведення контролю.

На території колишнього СРСР вперше тепловізійне обстеження димових труб було здійснене у 1983 р. на залізобетонній трубі висотою 250 м з притиском [8]. Протягом 1984–1985 рр. було проведено термографування 25 димових труб з притиснутою до залізобетонного стовбура футерівкою.

Одночасно з розширенням практики застосування пасивного тепловізійного методу для дистанційного визначення технічного стану димових труб розпочалися роботи з розшифрування отриманих термограм зовнішніх поверхонь труб з метою оцінки їх технічного стану. Термограми аномалій температурного поля на зовнішній поверхні

димової труби формуються під дією температурного потенціалу димових газів димової труби й залежать від багатьох факторів: конструкції труби, теплофізичних властивостей матеріалів, умов теплообміну з середовищем та ін. В процесі експлуатації в димових трубах можуть з'являтися дефекти різного характеру: тріщини у стовбурі та футерівці, випадіння окремих цеглин футерівки, розшарування наявних в трубі шарів, зволоження внутрішніх шарів, внутрішня та зовнішня корозія стовбуру тощо. Саме такі дефекти й призводять до локальних змін температурних полів на зовнішній поверхні димових труб.

Наведені в роботі [8] результати моделювання фрагменту димової труби, що складався з бетонної стінки, футерівки з кислотостійкої цегли та розміщеної між ними теплоізоляції, показали, що тепловий потік у радіальному напрямку труби суттєво зменшується внаслідок великого термічного опору теплоізоляційного шару. В таблиці наведені значення розрахункових і вимірних питомих теплових потоків крізь експериментальний фрагмент димової труби в залежності від її конструкції.

Із наведених у таблиці даних випливає, що дефекти у футерівці тришарової конструкції труби (залізобетон – теплова ізоляція (мінеральна вата) – футерівка) методом тепловізійного діагностування визначити складніше, тому що у цьому випадку внаслідок термічного опору теплової ізоляції потік тепла крізь бетонну стінку знижується у 2-3 рази, в результаті чого знижується абсолютна температура зовнішньої поверхні димової труби. Саме тому наявність теплової ізоляції перешкоджає виявленню й інших дефектів, крім теплової ізоляції, за рахунок відносно малих значень температурних опорів решти конструктивних шарів. Тому навіть при використанні в процесі проведення експериментальних досліджень тепловізора AGA-782 (Швеція) діапазон його чутливості на той час (1980-ті рр.) був недостатнім для отримання термограм зовнішньої поверхні труби, температури якої відповідали інтервалу до 5...10 °С вище температури навколишнього середовища.

Незважаючи на недосконалість перших тепловізорів одразу почали проводитися дослідження з розробки способів визначення технічного стану промислових димових труб. І тут виникла основна проблема: як встановити зв'язок між зареєстрованими

Питомі теплові потоки, що проходять крізь бетонну стінку в залежності від конструкції труби

Конструкція фрагменту	Питомий тепловий потік, Вт/м ²	
	розрахунковий	вимірний
Бетонна стінка	670	581
Бетонна стінка + кладка футерівки	346	278
Бетонна стінка + теплоізоляція + кладка футерівки	127	119

ними аномаліями температурного поля на поверхні труби і параметрами її внутрішньої структури. На жаль і до сьогодення часу загальних рекомендацій щодо вирішення цієї проблеми не існує внаслідок відсутності універсальної методики обробки термограм. Це пов'язано в першу чергу з тим, що кожен тип димової труби має свої особливості аномального розподілення температури на її поверхні (й на різних її ділянках), які можуть бути викликані різними факторами.

Роботи в цьому напрямку в основному були пов'язані з розробкою моделей термограм аномальних температурних полів на зовнішній поверхні димової труби, викликаних наявністю дефектів у її структурі. Дослідження проводилися з використанням прямої задачі дефектоскопії у двох напрямках:

- розробка теоретичних розрахункових моделей температурних полів дефектів димової труби;
- отримання експериментальним шляхом моделей температурних полів штучних дефектів в структурі димової труби.

Для розробки розрахункових моделей розміщення температурних полів на зовнішній поверхні однієї із залізобетонних труб, яка була виконана з притискною ізоляцією з діатомової цегли та мінеральних плит між залізобетонним стовбуром і футерівкою, була здійснена тепловізійна фіксація із трьох точок термограми температурного поля зовнішньої поверхні димової труби висотою 180 м. Температура димових газів складала 146 °С, а зовнішнього повітря – 16,5 °С. На термограмі труби зміна температури по всій її поверхні відповідала діапазонам 21...26 та 19...24 °С. Проектному стану димової труби відповідала температура близько 9 °С.

Для такої залізобетонної труби були розраховані можливі зміни температури на зовнішній поверхні стовбура за висотою в залежності від стану її конструкції. Графіки кривих зміни температури за висотою стовбура наведені на рис. 5.

Максимум температур близько 25 °С на зовнішній поверхні стовбура димової труби і за тепловими розрахунками згідно з графіками в своїй більшості відповідав конструктивному стану труби без притискної ізоляції.

Наведений спосіб отримання теоретичних термограм шляхом проведення розрахунків температурних полів на зовнішній поверхні труби для умов тепловізійної зйомки був проведений лише з урахуванням конструктивних варіантів димової труби у стаціонарному режимі її роботи. В дійсності при розшифруванні отриманих термограм та при проведенні теплоаеродинамічних розрахунків димових труб необхідно проводити старанний аналіз з урахуванням різноманітних змін теплообмінних та теплофізичних коефіцієнтів, які в сукупності своїй за-

лежать від дійсної температури та швидкості газів у димовій трубі, температури зовнішнього повітря в період тепловізійної зйомки, швидкості вітру, вологості повітря тощо. При цьому розрахунки мають виконуватись з припущенням, що конструкція димової труби виконана у відповідності до проекту.

При аналізі причин неспівпадіння термограм димової труби, отриманих шляхом тепловізійної зйомки результатам аналітичних розрахунків необхідно додатково проводити розрахунки при зміні різних факторів. Серед причин неспівпадіння можна вважати невідповідність фактичної конструкції димової труби її проектному рішенню, неточності визначення теплообмінних коефіцієнтів та інших факторів, у тому числі й зовнішнього середовища.

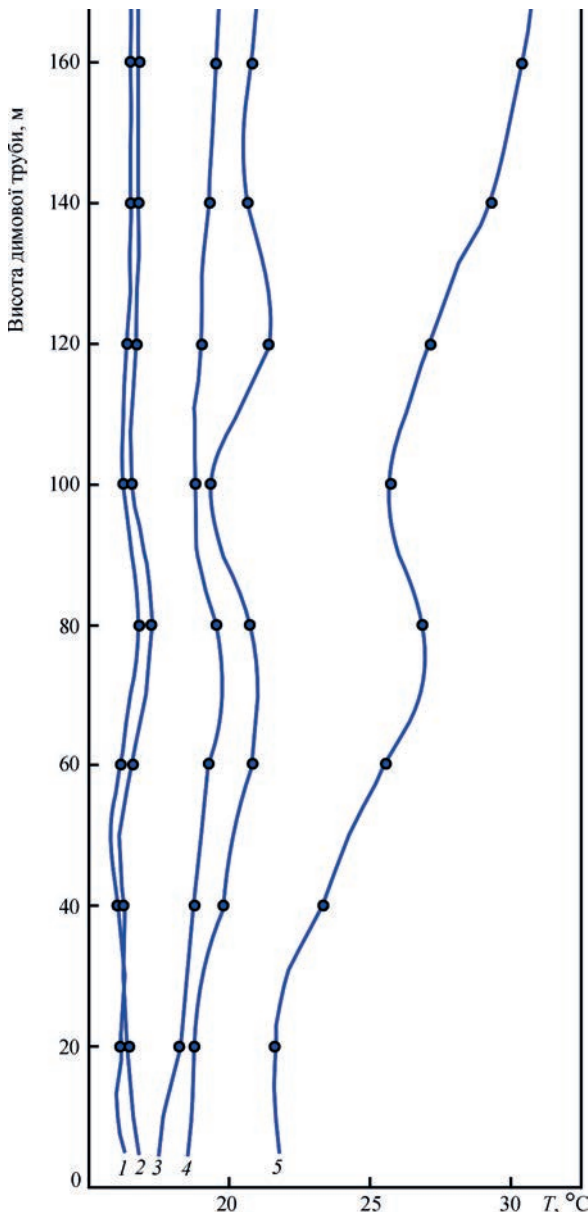


Рис. 5. Розрахункові зміни температури на зовнішній поверхні стовбура димової труби за висотою в залежності від її конструкції: 1 – проектна конструкція (залізобетонний стовбур, футерівка, теплова ізоляція, притискна ізоляція); 2 – конструкція без футерівки; 3 – конструкція без теплової ізоляції; 4 – конструкція без притискної ізоляції; 5 – одношарова конструкція

Але при наявності дефектів різноманітного характеру в структурі складових частин димової труби аналітичне дослідження температурних полів в зоні дефекту має суттєві труднощі, тому що задача теплотехнічного розрахунку перетворюється в цьому випадку із одновимірної як мінімум у двовимірну. Оскільки аналітичних рішень двовимірних задач для тришарової конструкції димової труби немає, то результати тепловізійних зйомок у вигляді термограм її поверхні не дають прямої відповіді на питання про її технічний стан.

Застосування другого способу для визначення технічного стану димової труби, пов'язаного з використанням моделей термограм температурних полів її зовнішньої поверхні шляхом виготовлення у її структурі штучних дефектів, вимагає значних витрат часу та коштів на виготовлення фрагментів таких труб, а також проведення експериментальних досліджень. Визначення технічного стану димових труб з використанням моделей обох видів здійснюється шляхом порівняння реальних термограм температурних полів несущільностей в структурі труби з теоретичними або експериментальними моделями термограм температурних полів.

На рис. 6 наведена структурна схема процесу визначення технічного стану димової труби пасивним тепловізійним методом з використанням теоретичних та експериментальних моделей термограм аномалій температурних полів зовнішньої поверхні труби.

Із схеми рис. 6 випливає, що процес визначення технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом шляхом вирішення прямої задачі дефектоскопії на даний час складається з двох етапів:

- збирання даних пасивним тепловізійним методом контролю про несущільності в структурі димової труби у вигляді аномалій температурного поля на зовнішній поверхні;
- обробка даних контролю з використанням моделей термограм аномалій температурних полів дефектів димових труб для оцінки їх технічного стану. Прийняття рішення про технічний стан димової труби в цьому випадку має статистичний характер.

Необхідно зауважити, що розробка теоретичних та експериментальних моделей термограм температурного поля є рутинною процедурою і практично не відповідає реальним умовам експлуатації промислових димових труб. Процес розшифрування отриманих термограм аномалій температурного поля зовнішньої поверхні труби вимагає від дефектоскопіста значного досвіду та методологічних підходів. Тому фактично на сьогоднішній період офіційних методів оцінки технічного стану функціонуючих димових труб без зупинки будь-якого технологічного процесу практично не розроблено [9].

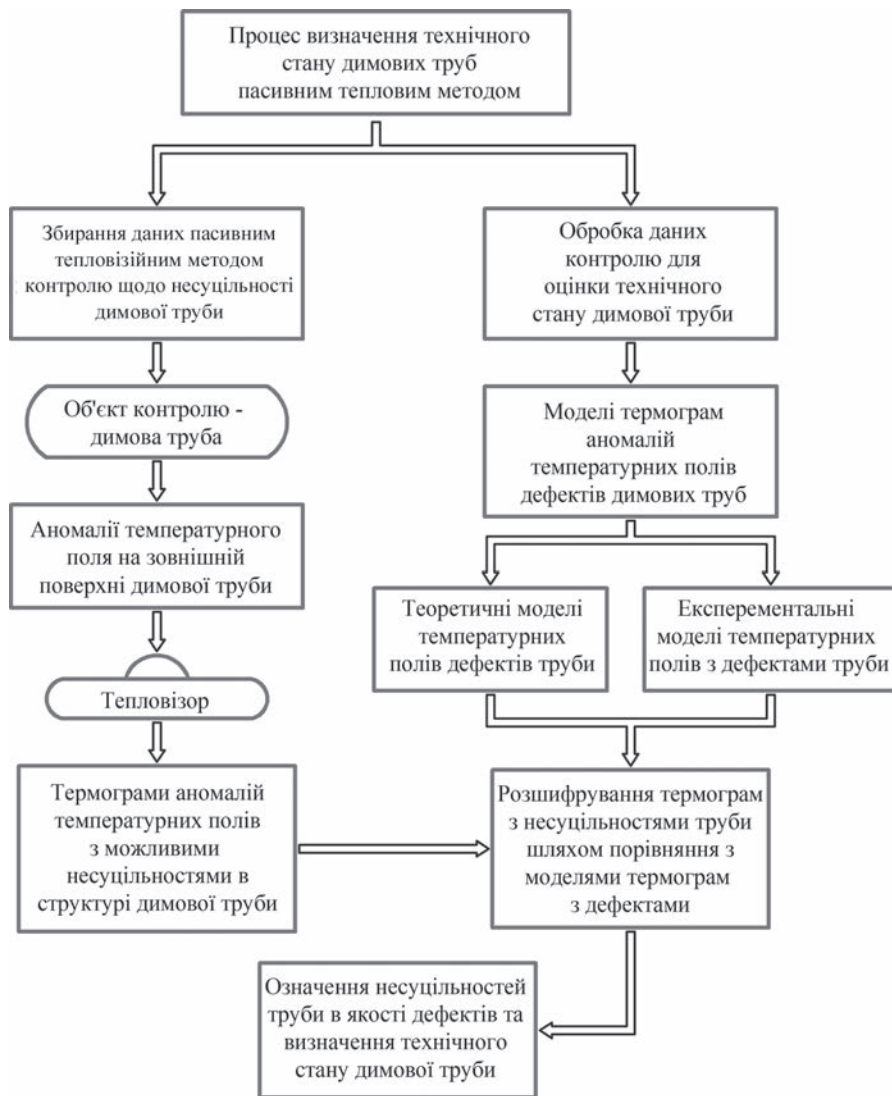


Рис. 6. Структурна схема процесу визначення технічного стану димових труб пасивним тепловізіонним методом

Це підтверджується також й більш пізніми результатами досліджень, наведеними в роботі [10]. Виявлення прихованих дефектів димових труб при використанні пасивного тепловізіонного методу ґрунтується на використанні принципу порівняння аномалії температурного поля на поверхні труби з еталонною (бездефектною). Еталонна зона аномалії визначається з технологічних міркувань проблеми або в ході тепловізіонної зйомки.

На даний час висновок про технічний стан димової труби в значній мірі приймається на основі аналізу амплітуди виявленої температурної аномалії та морфології температурних зон на зовнішній поверхні димових труб. Кінцевий користувач димової труби рішення про ступінь критичності виявлених дефектів пасивним тепловізіонним методом приймає також на підставі існуючих методик та стандартів.

Вирішення задачі визначення технічного стану димових труб без виведення їх з експлуатації лежить у площині використання методів і моделей теплової дефектометрії та теплової томографії, які успішно розвиваються в активному теплово-

му контролі. Розробка методів і моделей теплової дефектометрії та теплової томографії для пасивного тепловізіонного методу дозволить реалізувати автоматизовані тепловізіонні технології у структурі контрольно-діагностичного процесу, що підвищить достовірність виявлення дефектів в димових трубах в масштабі реального часу.

Висновки

1. Серед важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів промислових підприємств найбільше розповсюдження отримали димові труби різного призначення, дистанційне пасивне тепловізіонне діагностування яких є важливою й невід'ємною частиною визначення їх технічного стану.

2. Своєчасне проведення обстеження технічного стану димових труб пасивним тепловізіонним методом, що не вимагає зупинки виробничих процесів, дозволяє на початковій стадії виявити в структурі труб різноманітні дефекти й прогнозувати їх розвиток.

3. Аналіз виявлених дефектних зон димової труби дозволяє знизити затрати на проведення нового інструментального обстеження труб, а своєчасний їх ремонт дає можливість експлуатувати димові труби без аварійних ситуацій.

Список літератури

1. Маслова В.А., Стороженко В.А. (2004) *Термография в диагностике и неразрушающем контроле*. Харьков, Компания СПИТ.
2. Бажанов С.А. (2000) *Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств*. Приложение к журналу «Энергетик». Москва, НТФ Энергопрогресс.
3. Бабак В.П. (2016) Моніторинг об'єктів теплоенергетики з використанням безпілотних літальних апаратів. *Збірка доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT – 2016»*. Київ, УТ НКТД, сс. 48–53.
4. Вавилов В.П. (1991) *Тепловые методы неразрушающего контроля*: Справочник. Москва, Машиностроение.
5. Ельшин А.М., Ижорин М.Н., Жолудев В.С., Овчаренко Е.Г. (2001) *Дымовые трубы*. Сатъянов С.В. (ред.). Москва, Стройиздат.
6. Ханухов Х.М., Яровой С.Н. (2017) Повреждаемость металлических дымовых труб и несущих башен на протяжении жизненного цикла и предельные значения основных дефектов и повреждений. *Строительство, материаловедение, машиностроение*, **99**, 218–227.
7. Заседачев И.Б., Дужих Ф.П. (1970) Контроль эксплуатационных режимов работы дымовых железобетонных труб. *Электрические станции*, **11**, 42–44.
8. Дужих Ф.П. (1988) Тепловизионное обследование температурных полей в дымовых трубах. *Теплоэнергетика*, **5**, 51–55.

9. Яблонько Е. (2011) Основные проблемы в эксплуатации дымовых труб. *Молодой ученый*, **9**, 65–68.
10. Бабушкин Р.А., Глызов Д.С., Иванов Ю.П. (2015) Тепловизионная диагностика дымовых труб. *Инновационная наука*, **9**, 52–57.

References

1. Maslova, V.A., Storozhenko, V.A. (2004) *Thermography in diagnostics and non-destructive testing*. Kharkov, SPIT Company [in Russian].
2. Bazhanov, S.A. (2000) *Infrared diagnostics of electric equipment of switching devices*. Appendix to Journal «Energetik». Moscow, NTF Energoprogress [in Russian].
3. Babak, V.P. (2016) *Monitoring of thermal power engineering facilities using drones*. In: *Proc. of 8th Nat.Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics – UkrNDT – 2016*, Kyiv, UT NKTD, 48-53 [in Ukrainian].
4. Vavilov, V.P. (1991) *Thermal methods of nondestructive testing*: Refer. book. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Elshin, A.M., Izhorin, M.N., Zholudev, V.S., Ovcharenko, E.G. (2001) *Flue pipes*. Ed. by S.V.Satianov. Moscow, Strojizdat [in Russian].
6. Khanukhov, Kh.M., Yarovoj, S.N. (2017) Damage level of metal flue pipes and load-carrying towers during the life cycle and limit values of the main defects and damage. *Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroenie*, **99**, 218–227 [in Russian].
7. Zasedatelev, I.B., Duzhykh, F.P. (1970) Control of operational modes of flue concrete pipes. *Elektricheskie Stantsii*, **11**, 42–44 [in Russian].
8. Duzhykh, F.P. (1988) Thermal imaging of temperature fields in flue pipes. *Teploenergetika*, **5**, 51–55 [in Russian].
9. Yablonko, E. (2011) Main problems in flue pipe operation. *Molodoj Uchyonyj*, **9**, 65–68 [in Russian].
10. Babushkin, R.A., Glyzov, D.S., Ivanov, Yu.P. (2015) Thermal imaging diagnostics of flue pipes. *Innovatsionnaya Nauka*, **9**, 52–57 [in Russian].

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ ПАССИВНЫМ ТЕПЛОВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ

В.Ю. Глуховский, О.Г. Бондаренко

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

Выполнен анализ отраслей промышленности, в которых получил распространение пассивный тепловизионный метод контроля для диагностирования технического состояния труднодоступных и потенциально опасных промышленных объектов. Рассмотрены условия эксплуатации наиболее распространенных потенциально опасных промышленных дымовых труб. Проанализированы причины образования и основные типы дефектов и повреждений в структурных элементах дымовых труб. Приведены основные способы оценки технического состояния дымовых труб пассивным тепловизионным методом путем решения прямой задачи дефектоскопии с использованием моделей термограмм аномалий температурных полей на внешней поверхности дымовой трубы. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: дымовая труба, пассивный тепловизионный метод контроля, причины образования несплошностей, способы оценки технического состояния

FEATURES OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF INDUSTRIAL FLUE PIPES BY PASSIVE THERMAL IMAGING METHOD

V.Yu. Glukhovskiy, O.G. Bondarenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Analysis of industries, where passive thermal imaging methods of control became accepted for diagnostics of technical condition of difficult-of-access and potentially hazardous industrial facilities, was performed. Service conditions of the most common potentially hazardous industrial flue pipes were considered. The causes for formation and main types of defects and damage in structural elements of flue pipes were analyzed. The main methods for assessment of technical condition of flue pipes by passive thermal imaging method are presented, that is performed by solving the direct flaw detection problem using models of thermograms of anomalies in temperature fields on the flue pipe outer surface. 10 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Key words: flue pipe, passive thermal imaging method of control, causes for formation of discontinuities, methods of assessment of the technical condition

Надійшла до редакції
17.07.2019

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ К ПРОЦЕССАМ ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ

В.Л. Алексенко¹, А.А. Шарко², С.А. Сметанкин¹, Д.М. Степанчиков², К.Ю. Юренин¹

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

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

Приведены результаты исследования заисимости акустической эмиссии, возникающей при деформации образцов из эпоксидной смолы ЭД-20, с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса, отражающие эволюцию физических механизмов деформации при нагружении образцов. Установлены закономерности формирования акустико-эмиссионных и тензометрических диагностических сигналов в процессе деформации при четырехточечном изгибе. Регистрируемые сигналы обработаны в реальном масштабе времени. Акустическая эмиссия описывалась с помощью информативных параметров сигнала отражающих его энергетические и частотные особенности. Определены напряжения, при которых начинается разрушение материала, согласованные по уровню силового воздействия. Полученные результаты и закономерности могут быть использованы при акустико-эмиссионном исследовании стадийности пластической деформации в композиционных материалах на основе эпоксидной матрицы. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, тензометрия, эпоксидная матрица, четырехточечный изгиб

Актуальность темы. Резервы оптимизации конструктивных материалов состоят в модификации матричных материалов, среди которых одними из наиболее перспективных являются эпоксидные смолы разного назначения. Это делает композиционные материалы на основе эпоксидной матрицы важными модельными объектами для изучения деформационных процессов механики сплошных сред. Эпоксидные смолы широко используются в промышленности в качестве связующих для формирования композитов, заливочных и защитных покрытий. Необходимость изучения процессов их упрочнения и структурообразования связана с тем, что они имеют высокую адгезионную прочность к металлам, минимальную усадку, малые остаточные напряжения, технологичность при нанесении их на сложные поверхности. Комплекс основных свойств эпоксидной смолы ЭД-20 исследован довольно подробно [1]. В то же время информация о деструктивных процессах, таких как моменты их возникновения, скорость и направление распространения дефектов в современной научной литературе отражены недостаточно.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что в процессе нагружения происходит изменение информативных характеристик акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов, отражающих физические механизмы деформации. Требования к характеристикам аппаратуры регистрации сигналов акустической эмиссии, а также к алгоритмам анализа сигналов определяются в зависи-

мости от характера исследуемого материала [2–4]. Большой практический интерес представляет анализ акустической эмиссии в процессах структурообразования полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы.

Достижение технической адекватности результатов неразрушающего контроля возможно при оптимальном использовании комбинаций различных методов испытаний. Благодаря тому, что акустическая эмиссия резко отличается по своим возможностям от традиционных методов неразрушающего контроля, на практике стараются совмещать АЭ с другими методами. В настоящей работе такое совмещение АЭ метода выполнено с тензометрическим контролем.

Совершенствование технической диагностики композиционных материалов направлено на создание автоматизированных систем и комплексов, позволяющих не только обнаруживать дефекты и устанавливать степень их опасности, но и оценивать напряженно-деформированное состояние материала под нагрузкой [4]. В этих условиях перспективно использование АЭ и тензометрического метода, так как их диагностические сигналы содержат информацию о динамике происходящих процессов. Основное преимущество метода АЭ связано с возможностью проведения неразрушающего контроля, всего объекта за один цикл нагружения.

Целью работы является исследование особенностей совместных измерений акустической эмиссии и

тензометрии при диагностике пластической деформации композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы при четырехточечном изгибе.

Материалы и методы исследования. Эпоксидные смолы представляют собой олигомеры, содержащие в молекуле не менее двух глицидиловых групп, способных под действием отвердителя образовывать сшитые полимеры. Наибольшее применение в промышленности нашли эпоксидо-диановые смолы, представляющие собой олигомерные продукты конденсации дифенилпропана с эпихлоргидрином.

Механизм отверждения эпоксидно-диановых смол заключается как во взаимодействии их функциональных групп с группами отвердителя, так и между собой, что приводит к удлинению молекул и образованию поперечных связей. В результате получают твердые прочные полимеры. Основное свойство эпоксидных смол – способность к полимеризации до твердого состояния в присутствии отвердителя. Отвержденные смолы характеризуются высокой адгезией к металлу, к стеклу и бетону.

В качестве матричного материала выбрана диановая смола ЭД-20 отверждаемая полиэтиленполиамином (ПЭПА). Химические формулы и пространственные структуры матрицы и отвердителя представлены на рис. 1, 2. Отвердитель эпоксидной смолы ЭД-20 ПЭПА не выделяет никаких вредных веществ. Образцы, предназначенные для измерений, имели размеры: 10×15×120 мм. Отверждение матричного материала происходило в течение 24 ч при комнатной температуре. Готовые образцы были подвергнуты тепловой обработке при температуре 80 °С в течение пяти часов.

Эпоксидные смолы после введения отвердителя преобразуются в сетчатые полимеры, которые содержат различные узлы сшивки: химические, физические и топологические. Химические узлы, определяемые связями химической природы, не растворимы в щелочах и кислотах; физические, образованные за счет электростатических, ван-дер-ваальсовских и водородных связей, вследствие низкой прочности физических

узлов сшивки могут переходить в вязкотекучее состояние. Топологические узлы сшивки, образованные механическим переплетением макромолекул, представляют собой узлы, продетые один сквозь другой как звенья одной цепи [1]. Они могут связывать между собой сетки разной химической природы.

Свойства эпоксидной смолы ЭД-20 холодного отверждения с отвердителем ПЭПА представлены ниже.

Физико-механические свойства эпоксидной смолы ЭД-20

Теплостойкость, °С	95
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа.....	50
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	113
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	115
Ударная вязкость, кгс·см/см ²	11
Относительное удлинение при разрыве, %	2,0
Диэлектрическая проницаемость	3,75
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,1
Плотность при 25 °С, г/см ³	1,2
Модуль упругости, Н/мм ²	3000...4500
Предел прочности, Н/мм ²	80

В полимерных композиционных материалах скорость распространения акустических волн зависит не только от плотности и упругих свойств, но также и от вязкости, пластичности и степени структурной неоднородности материалов.

Для оценки механических свойств материалов в хрупком или малопластичном состоянии используются испытания на изгиб. Особое значение такие испытания имеют для полимерных материалов, так как для них при практическом использовании преобладают изгибающие напряжения. Наибольшее распространение получили схемы трехточечного и четырехточечного изгиба [5, 6].

Результаты испытаний представляются в виде диаграмм $P(\Delta L)$ или $\sigma(\Delta L)$, где P – изгибающая нагрузка; σ – механическое напряжение; ΔL – стрела прогиба образца. При четырехточечном изгибе напряжение вычисляют по формуле:

$$\sigma = \frac{3Pl}{bh^2},$$

где l – длина образца между призмами; b – высота; h – ширина образца.

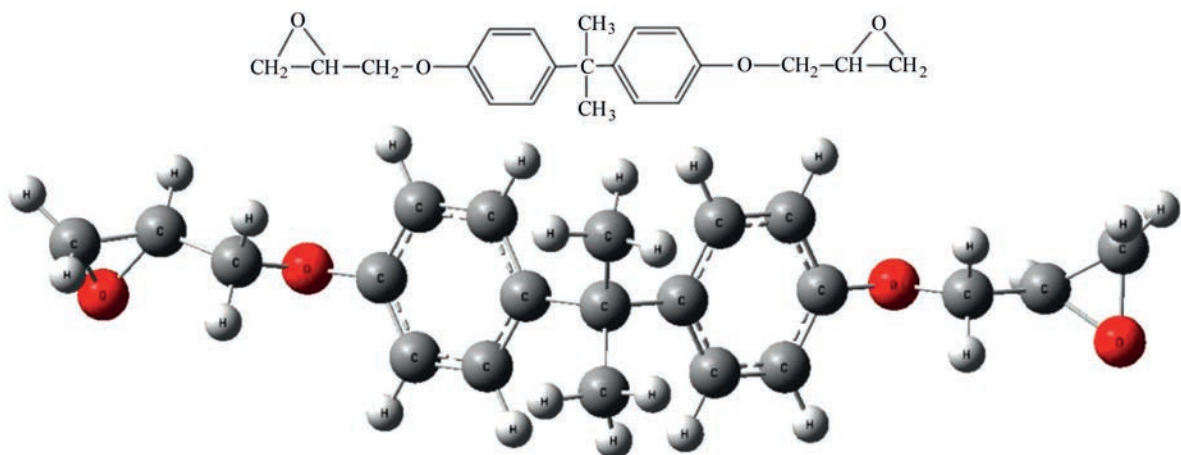


Рис. 1. Химическая формула и пространственная структура эпоксидной смолы ЭД-20

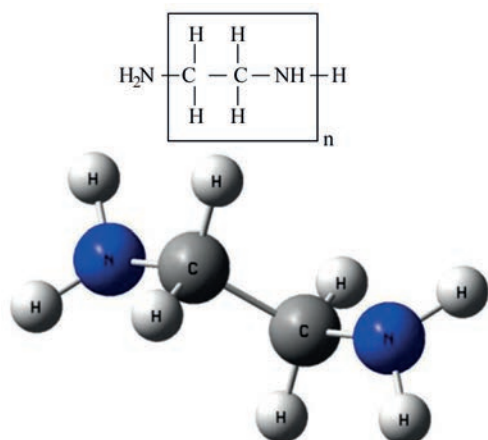


Рис. 2. Химическая формула и фрагмент пространственной структуры отвердителя ПЭПА

Последняя точка диаграммы соответствует разрушению образца. При такой схеме испытаний достигается однородное напряженное состояние по всей длине рабочей части образца, вследствие чего четырехточечная схема нагружения при определении модулей упругостей считается более надежной, чем трехточечная.

Согласно работам [5, 6] испытания на изгиб проводятся на установках, работающих по принципу заданного деформирования. Такие установки содержат два основных механизма: механизм деформирования и механизм силоизмерителя. Механизм деформирования состоит из двигателя, червячного редуктора, винта нагружения, верхней тарели и винта для отключения компенсационной пружины. На тарели закреплен нониус. Механизм силоизмерителя состоит из нижней тарели и передаточного механизма рычажного типа. Нагружение осуществляется вручную рукояткой механизма демпфирования или автоматически через двигатель или редуктор. Скорость нагружения определяется скоростью движения активной траверсы испытательной машины от момента запуска приводного устройства до момента разрушения образца и выбирается постоянной. Для измерения прогиба применяют датчики перемещения или датчики деформации, обеспечивающие измерение деформации с погрешностью не более 1%. Отсчет нагрузки производят по круговой шкале силоизмерителя.

Для повышения точности измерений при динамических испытаниях на изгиб установка дополнена системой синхронизации нагружения с регистрацией сигнала АЭ сопряженных с персональным компьютером. При акустических измерениях использовали широкополосные датчики к АЭ прибору АФ-15 с полосой пропускания 0,2...0,5 и 0,2...2,0 МГц. Конструктивно установка содержит систему управления нагружением, систему тензометрии, систему АЭ измерений. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.

Процесс испытаний осуществляется комбинировано как путем механических, так и АЭ изме-

рений. При этом процесс регистрации нагрузки, прогиба и измерения времени, а так же фиксации сигналов АЭ полностью автоматизированы посредством синхронизации обработки полученных данных с момента приведения в действие установки.

Таким образом, на компьютер одновременно поступает информация от параметров нагружающего устройства, прогиба и моментов возникновения сигналов АЭ в функции времени. При проведении испытаний информация о деформации и напряжении образца и амплитуд сигналов АЭ записывается в файл с заданной периодичностью.

Результаты и обсуждение. Акустическая эмиссия описывается с помощью информативных параметров сигнала, отражающих его энергетические и частотные особенности. Согласно принципу неопределенности, чем больше функция сконцентрирована во времени, тем больше она размыта в частотной области. При изменении масштаба функции произведения плотности вероятности временных и частотных диапазонов остаются постоянными. Поэтому результаты измерений представляются в виде временных (огигающая АЭ сигнала) и частотных (Фурье-преобразование АЭ сигнала) зависимостей сигналов под нагрузкой. Соответствующие результаты АЭ измерений для обоих датчиков с одновременной фиксацией нагрузки и прогиба образца представлены на рис. 4, 5.

В характере представленных временных зависимостей АЭ сигналов можно выделить высокочастотную составляющую, связанную с осцилляциями внутри сигнала и низкочастотную характеризующую огибающую [7]. Огибающая АЭ сигнала содержит локальные экстремумы. Площадь S под огибающей АЭ сигнала может быть соотнесена с энергией АЭ процесса.

При обработке экспериментальных данных использовалась система компьютерной математики Mathematica 9.0 и алгоритмы работы с массивами

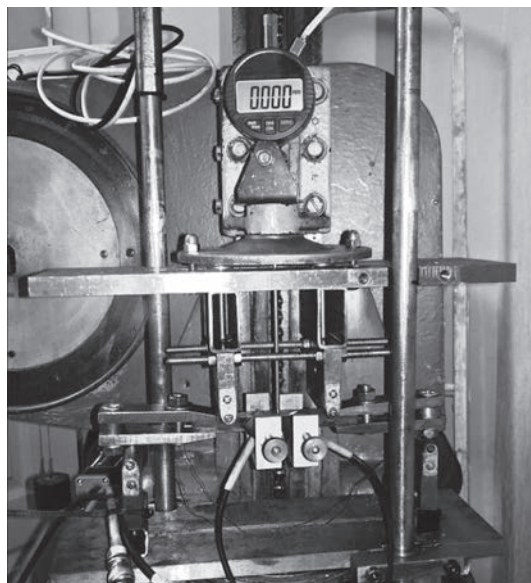


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

числовых данных: нахождение максимальных элементов массива, сортировка данных массива по признаку, объединение и интерполяция данных.

Также определены пиковые амплитуды U и плотности АЭ сигналов N . Пиковые амплитуды соответствуют абсолютному максимуму сигнала АЭ. Плотность АЭ сигнала определялась

путем подсчета количества пересечений порогового уровня сигнала, деленного на время наблюдения сигнала. Пороговый уровень принимался равным $0,2U_{\max}$ для каждого сигнала, где U_{\max} – максимальная амплитуда АЭ сигнала для каждого датчика, равная 7,16 и 23,50 мВ, соответственно.

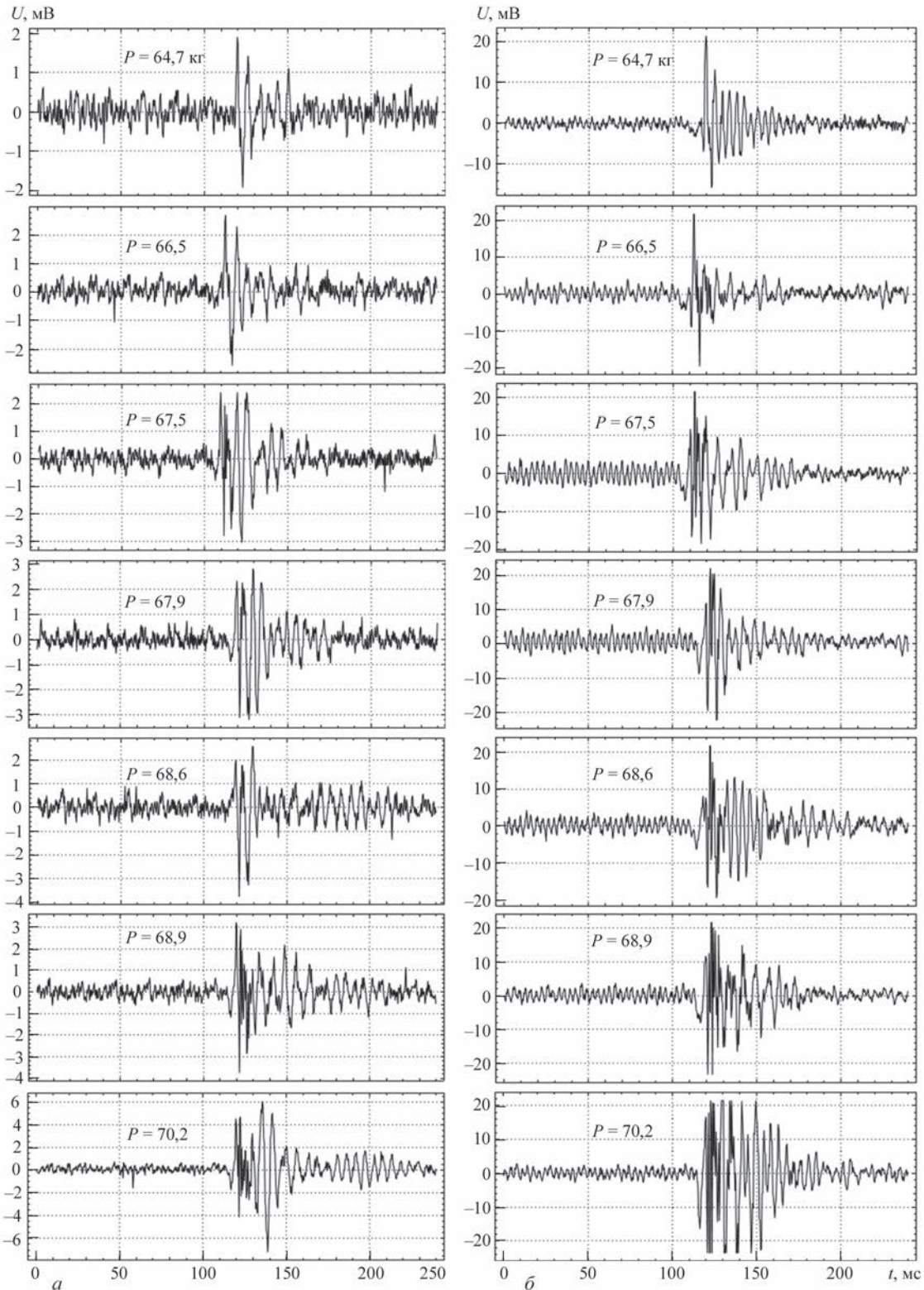


Рис. 4. Сигналы АЭ при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Аналогично для частотных зависимостей АЭ сигналов определены пиковые амплитуды C_s и плотности АЭ сигналов N_f . Пиковые амплитуды C_s соответствуют абсолютному максимуму частотного АЭ сигнала (преобразования Фурье). Плотность N_f частотного АЭ сигнала определялась путем подсчета количества пересечений порогового уровня сигнала, деленного на частотный

диапазон сигнала. Пороговый уровень принимался равным $0,2C_{smax}$ для каждого сигнала, где C_{smax} – максимальная амплитуда преобразования Фурье АЭ сигнала для каждого датчика, равная 6,29 и 22,50, соответственно.

Выбор величины порогового уровня АЭ сигнала в пределах 20 % максимальных амплитуд при проведении комплексных измерений временных и

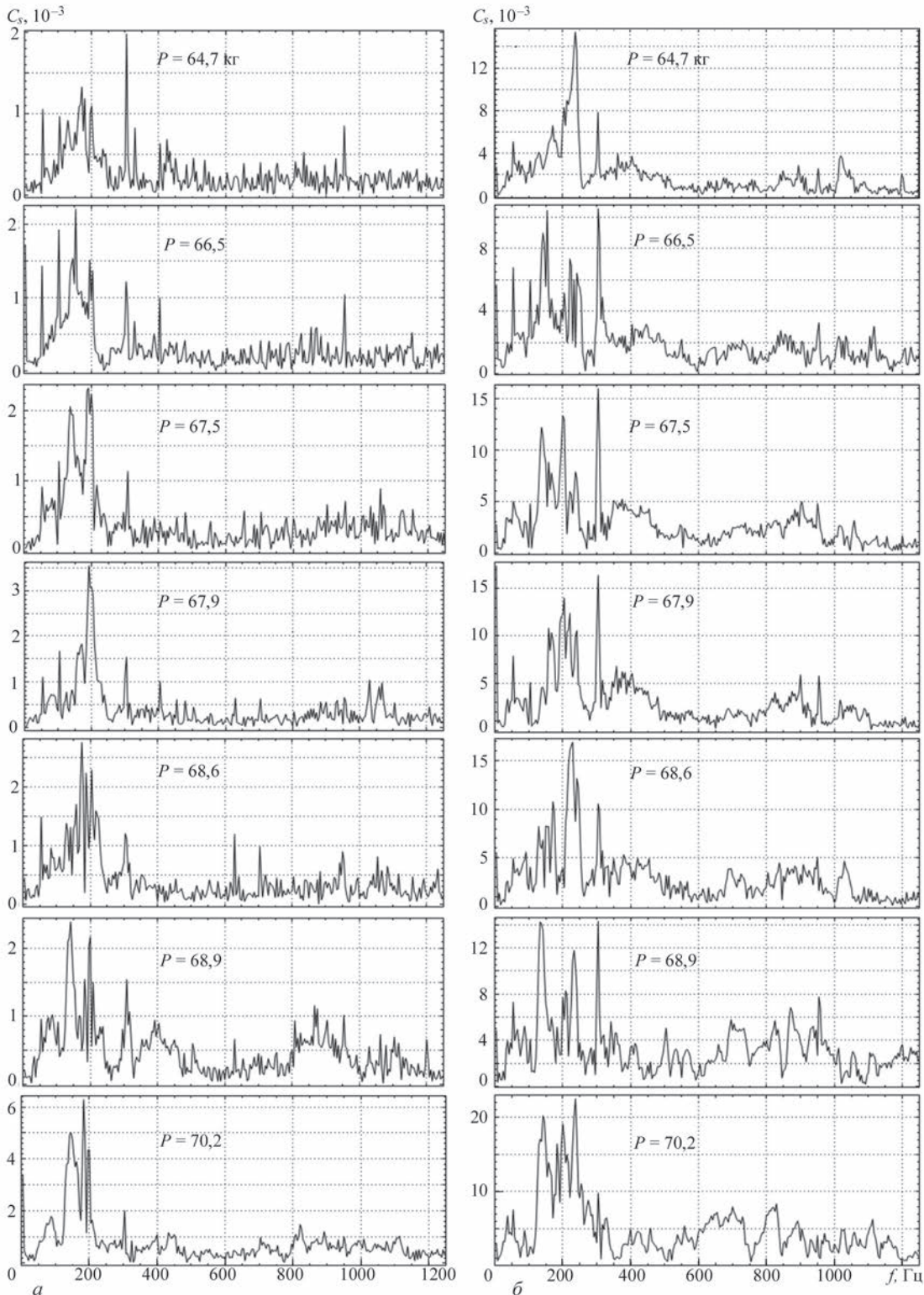


Рис. 5. Преобразования Фурье АЭ сигналов при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

частотных характеристик обусловлен значительной зашумленностью АЭ сигналов.

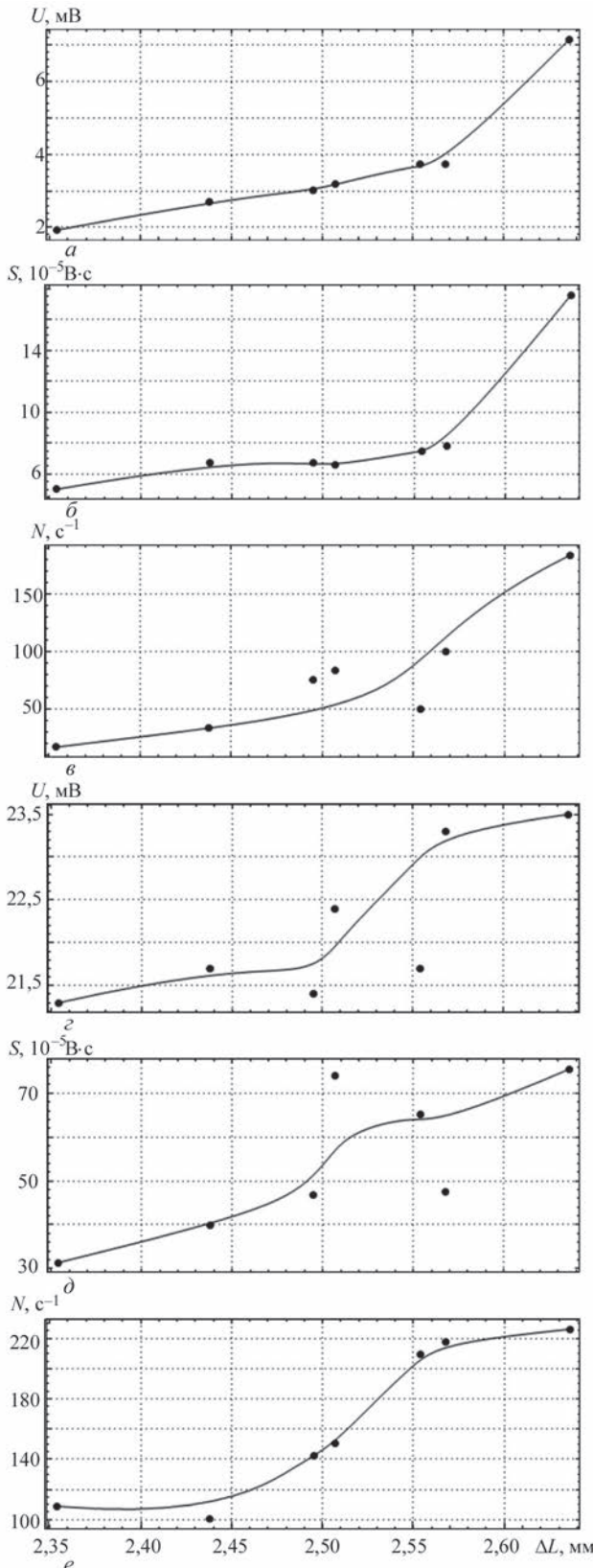


Рис. 6. Результаты комплексных измерений характеристик временных зависимостей АЭ сигналов: пиковые амплитуды (а, г), площади под огибающей (б, д) и плотности АЭ сигналов (в, е); а-в – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; г-е – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Результаты комплексных измерений характеристик временных и частотных зависимостей АЭ сигналов представлены на рис. 6, 7 и в табл. 1. Точки на рис. 6, 7 соответствуют моментам возникновения АЭ сигналов в исследуемом образце.

Все представленные на рис. 6, 7 характеристики имеют тенденцию к возрастанию с увеличением деформации. Следует, однако, отметить наличие определенных осцилляций значений характеристик, особенно проявляющихся для широкополосного (0,2...2,0 МГц) датчика АЭ. Тем не менее, можно однозначно констатировать увеличение энергии АЭ сигналов по мере приближения к зоне необратимых изменений и разрушения полимерной матрицы (рис. 8, зона III), что служит индикатором предкритического состояния исследуемого образца.

В связи со сложностью деформационных процессов в полимерных композиционных мате-

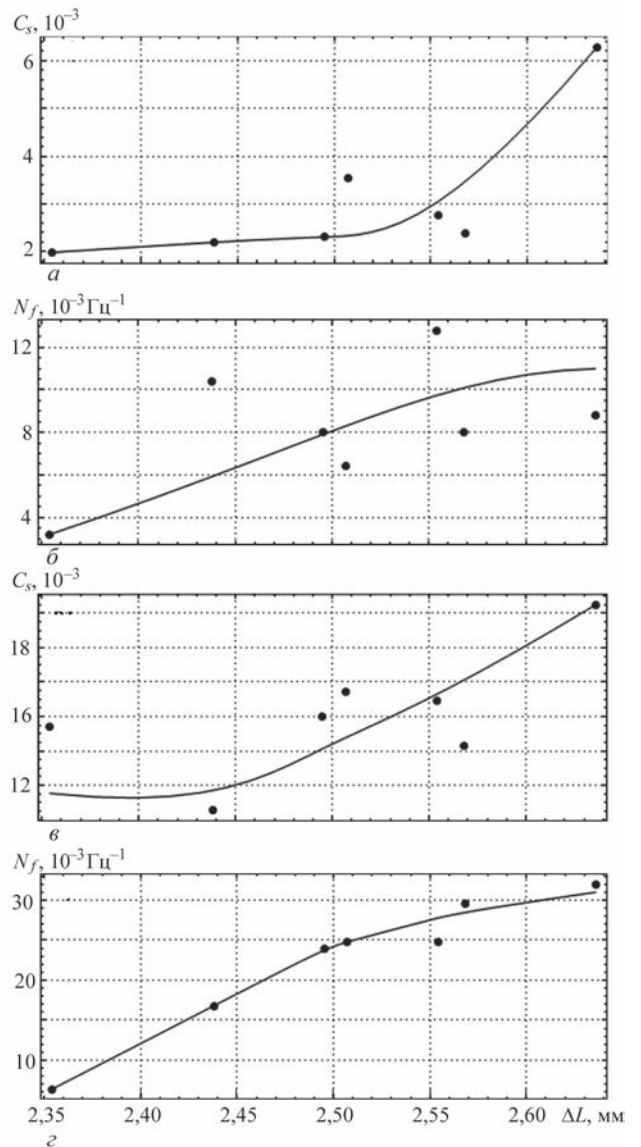


Рис. 7. Результаты комплексных измерений характеристик частотных зависимостей АЭ сигналов: пиковые амплитуды (а, в) и плотности АЭ сигналов (б, г); а, б – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; в, г – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Таблица 1. Результаты комплексных измерений характеристик временных и частотных зависимостей АЭ сигналов для эпоксидной смолы ЭД-20 при четырехточечном изгибе

Механические характеристики			Характеристики АЭ эффектов*				
			Временная зависимость			Частотная зависимость	
Нагрузка P , кг	Напряжение σ , МПа	Прогиб ΔL , мм	Пиковые амплитуды U , мВ	Площадь под огибающей S , 10^{-5} В \times с	Плотность сигналов N , с $^{-1}$	Пиковые амплитуды C_s	Плотность сигналов N_p , 10^{-3} Гц $^{-1}$
64,71	101,53	2,35	1,93	5,02	16,75	1,98	3,20
			21,30	31,37	108,88	15,40	6,40
66,57	104,45	2,44	2,71	6,73	33,50	2,20	10,40
			21,70	39,94	100,50	10,55	16,80
67,54	105,97	2,49	3,02	6,71	75,38	2,32	8,00
			21,40	46,78	142,38	15,97	24,00
67,96	106,63	2,51	3,18	6,57	83,75	3,55	6,40
			22,40	73,97	150,75	17,44	24,80
68,67	107,75	2,55	3,74	7,48	50,25	2,75	12,80
			21,70	65,13	209,38	16,93	24,80
68,93	108,16	2,57	3,74	7,79	100,50	2,39	8,00
			23,30	47,42	217,75	14,30	29,60
70,26	110,24	2,64	7,16	17,59	184,25	6,29	8,80
			23,50	75,50	226,13	22,50	32,00

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

риалах физическая интерпретация экспериментальных данных затруднена. Эпоксидная смола является довольно хрупким полимерным материалом. При изгибе разрушения инициируются локализацией напряжений на поверхности образца. Акты разрушения являются каналами диссипации упруго запасенной энергии.

Помимо хрупкого разрушения в эпоксидной смоле присутствуют локальные зоны течения материала с низкой плотностью сшивок олигомеров эпоксидных групп между собой, в результате чего эти зоны обладают большой пластичностью.

Числовые характеристики временных и частотных зависимостей АЭ сигналов эпоксидной смолы при четырехточечном изгибе представлены в табл. 1.

Для выделения стадий деформационного упрочнения вычислялся коэффициент деформационного упрочнения $K = d\sigma/dL$ [8]. Результаты механических испытаний и АЭ измерений представлены на рис. 8 в виде деформационной кривой $\sigma(\Delta L)$ и зависимости $K(\Delta L)$. Как следует из рис. 8, по изменению коэффициента деформационного упрочнения можно выделить четыре стадии деформационного упрочнения. Практически линейный участок $\sigma(\Delta L)$ в зоне I соответствует чисто упругой деформации, описываемой законом Гука и характеризуется нелинейным уменьшением коэффициента деформационного упрочнения $K(\Delta L)$. В зоне II происходит незначительное уменьшение наклона кривой $\sigma(\Delta L)$, а зависимость коэффициента деформационного упрочнения $K(\Delta L)$ выходит на горизонтальное плато, что свидетельствует об изменении механизма деформации. Надо полагать, это связано с протекающими в полимерной матрице процессами перестройки ее

внутримолекулярной структуры и последовательным выключением некоторых механизмов деформации. В зоне III наблюдается еще незначительное уменьшение наклона кривой $\sigma(\Delta L)$, а зависимость коэффициента деформационного упрочнения $K(\Delta L)$ имеет характерную ступеньку на горизонтальном плато. Соответствующее этому переходу механическое напряжение играет роль «спускового механизма» – преодолевается некоторый потенциальный барьер и происходит достаточно быстрая перестройка структуры. Молекулы перестраиваются таким образом, что исчезают «стопоры», существовавшие в исходном материале, сегменты макромолекул полимера приобретают определенную подвижность, следствием чего является ориентация макромолекул вдоль направления деформации [9]. В зоне IV наблюдается значительное изменение наклона кривой $\sigma(\Delta L)$, заканчивающееся практически горизонтальным участком, после которого наступает разрушение образца. Непосредственно перед разрушением коэффициент

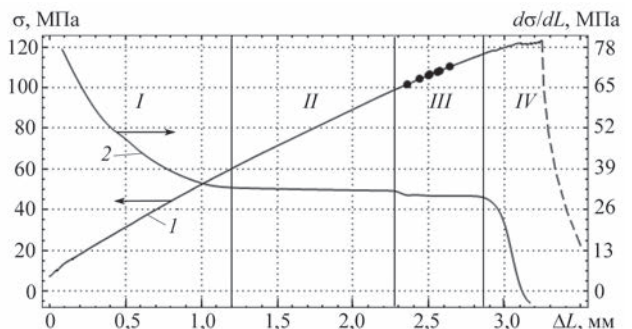


Рис. 8. Деформационное упрочнение эпоксидной смолы ЭД-20. Кривая 1 – механическое напряжение; кривая 2 – коэффициент деформационного упрочнения; I–IV – стадии деформационного упрочнения, точками обозначены моменты возникновения АЭ сигналов

Таблица 2. Информационные параметры АЭ сигналов, рекомендуемые к использованию для диагностики пластической деформации композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы при четырехточечном изгибе

Характеристика распределения	Информационный параметр	Характер определения	Характер проявления	Пригодность
Амплитудно-временное распределение	Пиковые амплитуды	Абсолютный максимум временного АЭ сигнала	Преимущественный рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Затруднения в идентификации для широкополосных АЭ датчиков ±
	Площадь под огибающей	Интегрирование массива локальных максимумов АЭ сигнала по времени	Преимущественный рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Наличие значительных осцилляций для широкополосных АЭ датчиков ±
	Плотность АЭ сигнала	Количество пересечений порогового уровня сигнала на единицу временного диапазона	Рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	+
Амплитудно-частотное распределение	Пиковые амплитуды	Абсолютный максимум частотного АЭ сигнала	Рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Наличие незначительных осцилляций +
	Плотность частотного сигнала	Количество пересечений порогового уровня сигнала на единицу частотного диапазона	Преимущественный рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Наличие значительных осцилляций для узкополосных АЭ датчиков ±

деформационного упрочнения $K(\Delta L)$ резко уменьшается. Скорее всего, это обусловлено появлением дефектов типа микротрещин.

Согласно данным эксперимента (рис. 8) все сигналы АЭ при изгибе располагаются в зоне III, которая характеризует предкритическое состояние образца, что значительно меньше значения разрушающего напряжения при изгибе, установленного по данным механических испытаний $\sigma = 120$ МПа. Таким образом, появление сигналов АЭ может служить предвестником необратимых изменений структуры полимерной матрицы.

В процессе нагружения наблюдается значительное изменение информативных характеристик АЭ сигналов, отражающее эволюцию физических механизмов деформации и смену доминирующих источников акустического излучения. При использовании явления АЭ для неразрушающего контроля необходимо установить набор параметров АЭ, несущих информацию о различных сторонах контролируемого процесса и выбрать из них наиболее оптимальные. Результаты исследования представлены в табл. 2.

Причиной установленных закономерностей изменения АЭ сигналов при изгибе является различная скорость напряжений в образце. В начальный момент разрушения скорость нарастания напряжений в локализованных дефектах структуры велика. По мере распространения разрушающих напряжений скорость падает, и материал по-другому начинает реагировать на нагрузку.

Механизм упрочнения весьма сложен, но главная роль отводится торможению вытягивания полимерной матрицы и ее формированию вследствие полимеризации олигомеров, а также сшивке сфор-

мированных полимерных цепей, путем образования поперечных связей между линейными и разветвленными молекулами [1, 10]. Увеличение плотности сетки химических связей приводит к снижению диссипативных свойств эпоксидной матрицы и ее способности противостоять хрупкому разрушению.

Выводы

1. Метод акустической эмиссии позволяет выявлять закономерности развития зоны поврежденности предкритического состояния материала под нагрузкой. Исследования сигналов акустической эмиссии, возникающих при механическом нагружении материала позволяют получить важную информацию о физических механизмах пластической деформации и разрушения.

2. Использование инструментария акустической эмиссии дает возможность проследить динамику структуры материала, ее развитие и обеспечить прогнозирование образования дефектов материала.

3. По данным АЭ процессы, протекающие в зоне разрушения, начинаются задолго до результатов механических измерений.

4. Методами акустической эмиссии определяются предвестники начала изменения структуры материала, в то время как механические испытания фиксируют его установившуюся стадию.

Список литературы

1. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Панин С.В. и др. (2014) Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении. *Физическая мезомеханика*, 17, 2, 65–83.
2. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2014) Некоторые особенности применения метода акустической эмиссии при

- контроле разрушения материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–11.
3. Филоненко С.В. (2011) Влияние неравномерности процесса разрушения композиционного материала на сигналы акустической эмиссии. *Технологические системы*, 1 (54), 24–31.
 4. Недосека А.Я., Недосека С.А., Шевцова М.А. и др. (2018) Акустическая эмиссия при испытании композитных материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 36–40.
 5. ГОСТ 28840-90. *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования.*
 6. ГОСТ 33519-2015 *Композиты полимерные. Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температуры.*
 7. Алексенко В.Л., Шарко А.В., Шарко А.А. и др. (2019) Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования при изгибе методом акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 32–38.
 8. Салита Д.С., Поляков В.В. (2018) Применение методов главных компонент исследованию акустической эмиссии при пластической деформации свинцовых сплавов. *Известия АлтГУ Физика*, 4(102), 26–30.
 9. Yudin V.A., Ivlev V.I., Fomin N.E., Sigachyov A.F. (2017) Mechanical Testing of CFRP with Epoxy Matrix. *Materials Physics and Mechanics*, 30, 53–60.
 10. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Панин А.В. и др. (2004) Мезоскопические структурные уровни деформации в поверхностных слоях и характер усталостного разрушения поликристаллов при знакопеременном изгибе. *Физическая мезомеханика*, 7, 2, 5–17.

References

1. Stukhlyak, P.D., Buketov, A.V., Panin, S.V. et al. (2014) Structural levels of fracture of epoxy composite materials under shock loading. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 17(2), 65–83 [in Russian].
2. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2014) Features of application of acoustic emission method at destructive testing of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 3–11 [in Russian].
3. Filonenko, S.V. (2011) Influence of nonuniformity of fracture process of composite materials on acoustic emission signals. *Tekhnol. Sistemy*, 1 (54), 24–31 [in Russian].
4. 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].
5. GOST 28840-90: *Machines for tensile, compression and bending tests of materials. General specifications* [in Russian].
6. GOST 33519-2015: *Polymer composites. Compression test method at normal, higher and lower temperature* [in Russian].
7. Aleksenko, V.L., Sharko, A.V., Sharko, A.A. et al. (2019) Identification by AE method of structural features of deformation mechanisms at bending. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 32–38 [in Russian].
8. Salita, D.S., Polyakov, V.V. (2018) Application of main component methods for studying acoustic emission at plastic deformation of lead alloys. *Izv. AltGU Fizika*, 4(102), 26–30 [in Russian].
9. Yudin, V.A., Ivlev, V.I., Fomin, N.E., Sigachyov, A.F. (2017) Mechanical testing of CFRP with epoxy matrix. *Materials Physics and Mechanics*, 30, 53–60.
10. Panin, V.E., Elskova, T.F., Panin, A.V. et al. (2004) Mesoscopic structural levels of deformation in near-surface layers and nature of fatigue fracture of polycrystals under alternating bending. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 7(2), 5–17.

ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ ТА ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ВИМІРІВ ДО ПРОЦЕСІВ ДІАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ

В.Л. Алексенко¹, А.А. Шарко², С.А. Сметанкин¹, Д.М. Степанчиков², К.Ю. Юренін¹

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

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

Наведено результати дослідження залежності акустичної емісії, що виникає при деформації зразків із епоксидної смоли ЕД-20, з використанням розробленого апаратно-програмного комплексу, що відображають еволюцію фізичних механізмів деформації при навантаженні зразків. Встановлено закономірності формування акустико-емісійних та тензометричних діагностичних сигналів у процесі деформації при чотирьохточковому вигині. Реєстровані сигнали оброблено в реальному масштабі часу. Акустичну емісію було описано за допомогою інформативних параметрів сигналу, що відображають його енергетичні та частотні особливості. Визначено напруги, при яких починається руйнування матеріалу, узгоджені за рівнем силового впливу. Отримані результати і закономірності можуть бути використані при акустико-емісійному дослідженні стадійності пластичної деформації в композиційних матеріалах на основі епоксидної матриці. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: акустична емісія, тензометрія, епоксидна матриця, чотирьохточковий вигин

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION AND STRAIN GAUGE MEASUREMENTS TO PROCESSES OF DIAGNOSTICS OF STRAIN HARDENING OF EPOXY MATRIX COMPOSITES

V.L. Aleksenko¹, A.A. Sharko², S.A. Smetankin¹, D.M. Stepanchikov², K.Yu. Yurenin¹

¹Kherson State Maritime Academy. 20 Ushakova Ave., 73000, Kherson, Ukraine. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

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

The paper gives the results of studying the dependence of acoustic emission arising at deformation of samples of epoxy resin ED-20, using the developed hardware-software complex, reflecting the evolution of physical deformation mechanisms at sample loading. Regularities of formation of acoustic emission and strain gauge diagnostic signals during deformation at four-point bending were established. Recorded signals were processed in real time. Acoustic emission was described using signal informative parameters, reflecting its energy and frequency features. Stresses at which material fracture begins were determined, which were matched by the level of force impact. Derived results and regularities can be applied at acoustic emission studies of the stages of plastic deformation in epoxy matrix composites. 10 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Keywords: acoustic emission, strain gauge measurement, epoxy matrix, four-point bending

Поступила в редакцію
21.08.2019

ОЦЕНКА ТВЕРДОСТИ И ЛОКАЛЬНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ КЕРАМИКИ И СТЕКЛА МЕТОДОМ ЦАРАПАНИЯ ДО СКАЛЫВАНИЯ КРОМКИ

В.В. Хворостяный, Ю.М. Родичев, Е.Б. Сорока

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.

E-mail: khvorostianyiv.v@ipp.kiev.ua

Приведены результаты экспериментального исследования закономерностей повреждаемости хрупких материалов, таких как стекло и керамика при локальном нагружении методом царапания индентором Роквелла поверхности образца до скалывания кромки. Определены значения твердости при царапании изучаемых хрупких материалов. Показано, что твердость при царапании превышает значения твердости при индентировании стандартным острым индентором преимущественно на 20 %. Представлены зависимости повреждаемости поверхности от нагрузки, а также между твердостью при царапании, повреждаемостью, модулем упругости и критическим коэффициентом интенсивности напряжений. Предложен способ использования экспериментальных диаграмм повреждаемости хрупких материалов для достоверного определения степени их локального разрушения в зависимости от уровня нагрузки. Библиогр. 23, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: керамика, стекло, царапание до скалывания кромки, твердость, расстояние разрушения, диаграммы повреждаемости

Техническая керамика и стекло являются линейно-упругими хрупкими неметаллическими конструкционными материалами, разрушение которых обычно происходит без значительных пластических деформаций. Прочность элементов из этих материалов зависит от состояния и сопротивления поверхности разрушению. Их низкая прочность при действии локальных нагрузок в условиях контактного взаимодействия с твердыми телами и элементами конструкций является сложной проблемой, которая требует учета при выборе сферы и способов применения в различных условиях эксплуатации [1–3].

В настоящее время в связи с трудностями расчетных оценок напряженно-деформированного состояния, механизмов повреждения и предельного состояния хрупких материалов при локальном нагружении, решение проблемных вопросов их прочности в таких условиях осуществляется преимущественно методами экспериментальной механики. Значительное развитие получили методы исследования механического поведения хрупких материалов при краевом локальном нагружении с использованием твердых инденторов или пуносонов [4–8]. При испытаниях, в которых реализуется принцип скалывания кромки твердым индентором, воспроизводятся условия, приближенные к реальным эксплуатационным и технологическим процессам локального разрушения хрупких материалов. Традиционно больше внимания уделялось исследованиям сопротивления разрушению кромки. Важными для практического приложения являются оценки повреждаемости поверхности и

края элементов в таких условиях. Однако закономерности повреждения технической керамики и стекол при локальном нагружении остаются недостаточно изученными. К преимуществам рассмотренных методов можно отнести простоту реализации и возможность применения для аттестации технической керамики и стекол, выбора материала, способов его обработки и контроля качества продукции на производстве. Поэтому исследования механического поведения керамических материалов и стекол при локальном нагружении являются актуальными.

Целью работы было изучение твердости и локальной повреждаемости современной конструкционной керамики и технических стекол методом царапания до скалывания кромки индентором Роквелла.

Экспериментальное исследование хрупких материалов осуществлялось методом царапания поверхности образца до скалывания его кромки (S+EF метод) в соответствии с методикой, изложенной в работах [6, 9]. Следует отметить, что в данных исследованиях учтены основные положения стандарта на метод испытаний по определению сопротивления краевому скалыванию технической керамики [10].

Объектом исследования были современные керамические материалы и стекла разного химического состава. Испытывали образцы оксидной керамики (оксиды скандия, иттрия, алюминия), нитрид кремниевой, карбид кремниевой и диоксид циркониевой керамики, а также листового, оптического и кварцевого стекла. Изученные материалы существенно отличаются по физико-механическим характеристикам, что позволило оценить их влияние на твердость и закономерности повреждения поверхности и края.

Использовали образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размерами $3,0 \times 4,0 \times 25,0 \dots 50,0$ мм, которые подвергались операциям механической обработки, включающей этапы шлифования и полирование алмазными пастами. Чистота поверхности, определяемая параметром среднего арифметического отклонения профиля R_a , составляла 1 мкм. Подготовленные кромки образцов были прямоугольными, без явных повреждений, таких как сколы или трещины, качество состояния которых соответствовало требованиям вышеупомянутого стандарта.

Параметром повреждаемости поверхности материала на стадии царапания с постоянной нагрузкой служила величина ширины царапины w_s , определяемая как расстояние между двумя краями образованной упругопластической канавки без учета возможных латеральных трещин или сколов (рис. 1). Под действием нагрузки, приложенной к индентору Роквелла, образуется след его продвижения по поверхности образца, в пределах которого наблюдаются неупругие деформации, смятие поверхностного слоя, образование кольцевых микротрещин Герца и абразивное разрушение, т. е. поверхность материала повреждается. При царапании имеет место сильное сжатие перед индентором и очень сильное растяжение позади него, а сам процесс характеризуется непрерывным нагружением и разгрузкой локальных участков поверхностного слоя материала, подвергающихся воздействию перемещающегося индентора. При этом фронт микротрещин Герца, латеральных трещин и сколов расширяется вперед и назад вдоль направления царапания.

По результатам испытаний были построены диаграммы повреждаемости хрупких материалов на стадии их царапания индентором (рис. 2). Уровень повреждений поверхности образцов линейно возрастал с увеличением приложенной нагрузки в диапазоне от 10 до 30 Н для стекол и от 10 до 50 Н для керамики. Максимальная повреждаемость при царапании была характерна стеклам, для которых по мере возрастания нагрузки ширина царапины изменялась в пределах от 70 до 130 мкм, а вид самой царапины от чередования кольцевых микротрещин Герца до четко очерченной канавки с латеральными трещинами и сколами. Степень

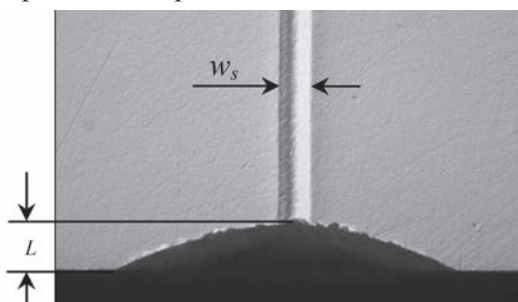


Рис. 1. Измерение расстояния разрушения L и ширины царапины w_s при испытаниях методом царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки

повреждения керамики в зависимости от твердости и уровня нагрузки изменялась в диапазоне от 50 до 90 мкм. Царапина представлялась главным образом без явных признаков конического растрескивания, так что разрушение материала можно охарактеризовать как упругопластическое.

Для описания экспериментальных диаграмм повреждаемости хрупких материалов при царапании были использованы линейные зависимости:

$$w_s = a + bP, \quad (1)$$

где a, b – коэффициенты кривой аппроксимации.

Используя коэффициенты этих уравнений можно прогнозировать степень повреждения поверхности материалов при локальном нагружении с использованием инденторов в рассмотренном диапазоне применяемого усилия.

На основании экспериментальных данных была получена оценка твердости при царапании H_S изучаемых хрупких материалов, которая вычислялась как отношение нормальной нагрузки к площади отпечатка [11]:

$$H_S = \frac{8P_f}{\pi w_s^2}, \quad (2)$$

где P_f – прикладываемая к индентору нормальная нагрузка, Н; w_s – измеренная ширина царапины, мм.

Значения твердости при царапании практически не зависели от уровня приложенной нагрузки. Но для уменьшения погрешности оценку твердости выполняли при нагрузке на индентор P_f равной 30 и 20 Н для керамических материалов и для стекла различных составов, соответственно. За счет проведения многократных испытаний (для каждого уровня применяемой нагрузки было выполнено не менее 10 экспериментов) были получены достоверные средние значения ширины царапины и, соответственно, вычислены средние величины твердости материала при царапании. Измерение ширины царапины выполняли с помощью оптического микроскопа на нескольких участках ее протяженности от места внедрения индентора на поверхности образца до области локального разрушения кромки скалыванием. Преимущественно ширина царапины при заданном уровне нагрузки на индентор оставалась постоянной по всей своей длине для керамики, тогда как для стекла в некоторых случаях наблюдались флуктуации – более заметные отклонения от среднего значения. Среди материалов данного исследования наибольшей твердостью характеризовались горячепрессованный карбид кремния ($H_S = 25,3$ ГПа) и оксид алюминия ($H_S = 21,2$ ГПа). Значительно менее твердым являлось стекло, для которого величина H_S не превышала $5 \dots 6$ ГПа. Полученные результаты определения повреждаемости на стадии царапания и твердости изученных материалов показали, что их повреждаемость при нагрузках $15 \dots 40$ Н почти в 3 раза уменьшается при увеличении твердости (рис. 3). Установленные закономерности повреждения хрупких ма-

териалов в зависимости от их твердости важны для выбора материалов при проектировании изделий.

Установленные значения твердости при царапании были сопоставлены с известными литературными данными о твердости рассматриваемых материалов, полученные другими стандартизованными методами, в частности, при статическом индентировании с использованием инденторов Виккерса или Кнуппа. Результаты сравнения показывают, что значения твердости при царапании H_S превышают значения твердости при индентировании HV (HK) на 10...20 % (табл. 1). Это связано с различными формами инденторов, уровнями нагрузок и способами формирования царапины и отпечатка. Таким образом, полученные результаты более достоверно учитывают особенности локального нагружения и деформирования хрупких материалов при определении твердости методом царапания индентором Роквелла.

Для получения дополнительной оценки конструкционных свойств рассмотренных материалов были построены корреляционные зависимости твердости H_S от их модуля упругости и трещиностойкости. Общие закономерности изменения твердости при царапании керамических материалов с различными значениями вязкости разрушения представлены на диаграмме (рис. 4, а) [20, 21]. Показано, что твердость H_S керамики и стекло нелинейно зависит от модуля Юнга и возрастает при его увеличении (рис. 4, б) [3, 22, 23].

Таким образом, в экспериментах S+EF методом в дополнение к параметрам повреждаемости и сопротивления разрушению материалов можно

Таблица 1. Сравнение экспериментальных значений твердости при царапании керамики и стекла с литературными данными твердости методом индентирования

Материал	Твердость при царапании H_S , ГПа	Твердость при индентировании HV (HK), ГПа
Al_2O_3	21,2	18,2 [12]
		18,0 [13]
Si_3N_4	21,2	16,0 [14]
		18,5 [15]
SiC HP	25,3	21,0 [13]
		24,0 [15]
Y-TZP	18,8	14,0 [12]
		17,8 [16]
Mg-PSZ	12,4	10,0...12,0 [17]
		10,0 [18]
Техническое стекло	6,8	5,9 [16]
		5,0...6,5 [19]

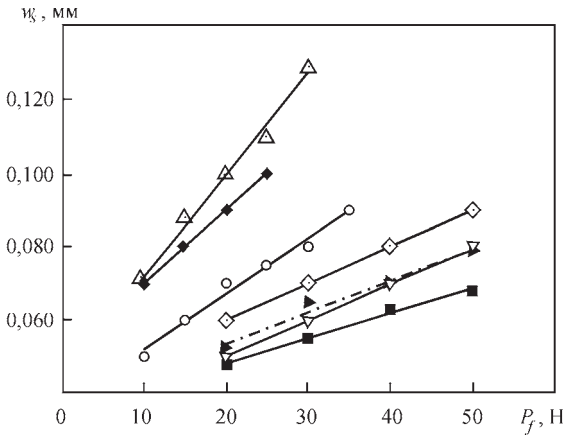


Рис. 2. Диаграмма зависимости повреждаемости поверхности образцов (параметра ширины царапины w_s) от приложенной к индентору нагрузки P_f для хрупких материалов, испытанных S+EF методом: Δ – стекло кварцевое КИ; \blacklozenge – тяжелый флинт ТФ-2; \circ – Sc_2O_3 ; \diamond – SF-S-TS; ∇ – Al_2O_3 -1; \blacktriangleright – Y-TZP-2; \blacksquare – SiC HP

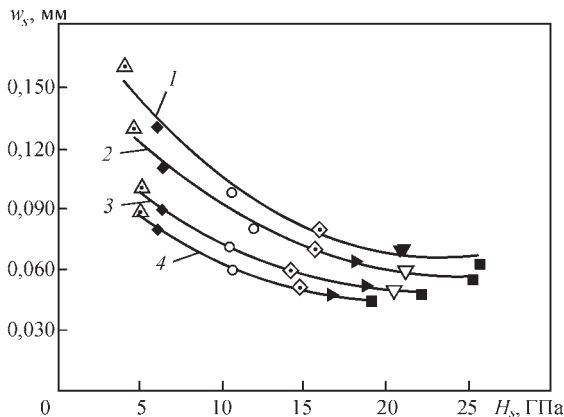


Рис. 3. Диаграмма зависимости повреждаемости поверхности образцов (параметра ширины царапины w_s) от твердости при царапании H_s для хрупких материалов, испытанных S+EF методом (1 – $P_f=40$ Н; 2 – 30; 3 – 20; 4 – 15): Δ – стекло кварцевое КИ; \blacklozenge – тяжелый флинт ТФ-2; \circ – Sc_2O_3 ; \diamond – SF-S-TS; ∇ – Al_2O_3 -1; \blacktriangleright – Y-TZP-2; \blacksquare – SiC HP

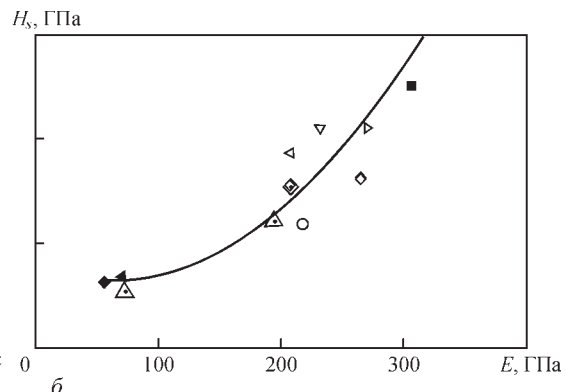
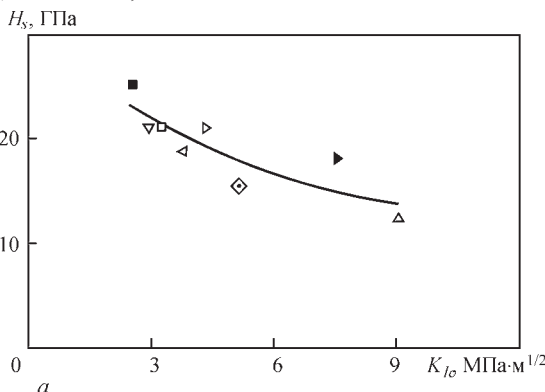


Рис. 4. Зависимости между твердостью при царапании H_S и трещиностойкостью K_{1c} (а) для керамики, модулем упругости E (б) для керамики и стекла: \blacksquare – SiC HP; ∇ – Al_2O_3 -1; \square – Y_2O_3 ; \triangleleft – Y-TZP-1; \triangleright – Si_3N_4 -1; \diamond – SF-S-TS; \blacktriangleright – Y-TZP-2; \triangle – TS-grade; \circ – Sc_2O_3 ; \diamond – Al_2O_3 -2; \blacklozenge – стекло ТФ-2; \blacktriangleleft – техническое стекло; \triangle – кварцевое стекло

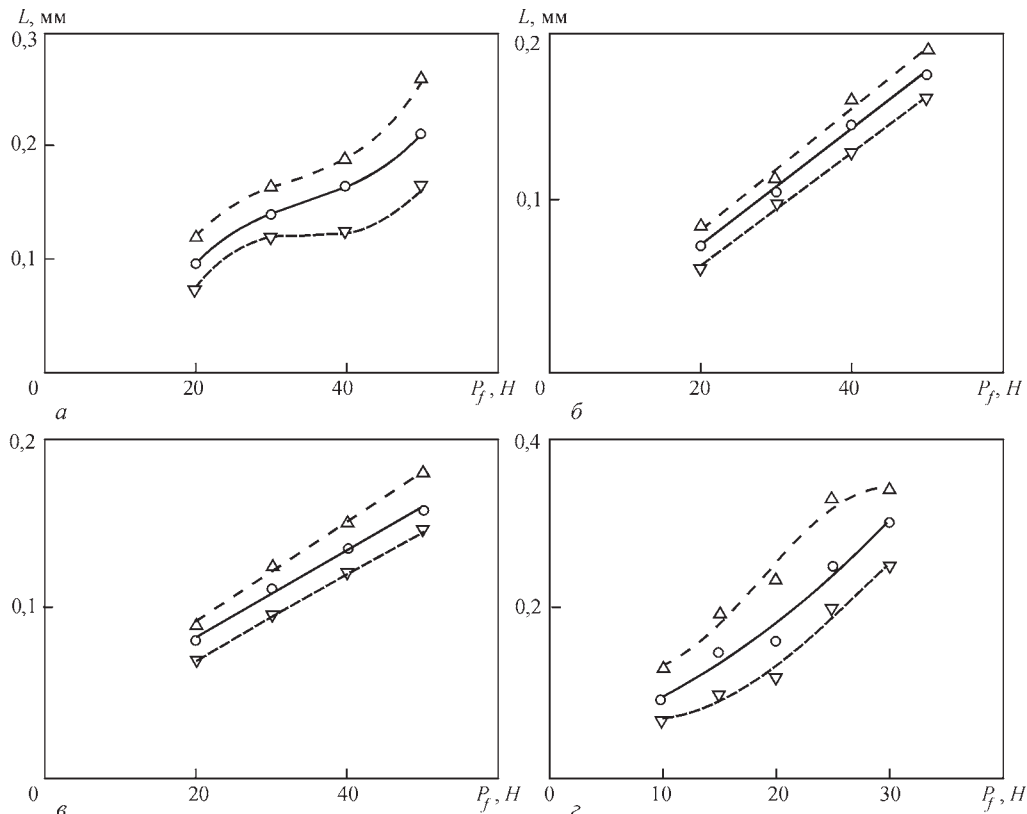


Рис. 5. Диаграммы повреждаемости керамики и стекла, испытанных S+EF методом, построенные для максимальных (Δ), средних (\circ) и минимальных (∇) значений расстояния разрушения L (линиями показаны соответствующие аппроксимации экспериментальных данных): *а* – оксид алюминия (Al_2O_3 -1); *б* – карбид кремния горяче-прессованный (SiC NP); *в* – диоксид-циркониевая керамика Mg-PSZ (SF-S-TF); *г* – стекло тяжелый флинт (ТФ-2)

получать также их величины твердости при царапании, которые следует рассматривать как оценочные и ориентировочные, близкие к значениям, вычисленных согласно стандартным методам.

Используемый метод исследований предусматривает стадию скалывания кромки хрупкого материала, происходящую в момент, когда индентор при царапании поверхности образца приближается на критическое расстояние к его краю. При этом кромка повреждается за счет распространения разрушающих трещин, которые на плоскости движения индентора по криволинейным траекториям пересекают боковую грань образца, а в плоскости перпендикулярной к его поверхности возникает характерный «ракушкообразный» шрам скола. [7, 9]. В качестве параметра повреждаемости кромки при краевом локальном нагружении традиционно принята величина расстояния разрушения L , определяемая как расстояние от кромки образца до наиболее отдаленной точки шрама скола на плоскости нагружения (рис. 1) [6, 12]. Измерение производимых повреждений хрупких материалов выполнялось с помощью оптического микроскопа с точностью до 1 мкм, а для анализа разрушений дополнительно использовали дифференциальный интерференционный контраст Номарского, что делало возможным получение изображений с большим разрешением и высоким контрастом.

Особенность метода царапания индентором поверхности образца до скалывания его кромки заключалась в том, что величина приложенной нагрузки задавалась экспериментатором непосредственно перед проведением опыта. В то же время величина расстояния разрушения являлась случайной величиной и характеризовала степень поврежденности края при скалывании. По результатам испытаний с различным уровнем нагрузки получены экспериментальные диаграммы повреждаемости изученных керамики и стекол в виде зависимостей «расстояние разрушения L – разрушающая нагрузка P_f ». Нанесенные на эти диаграммы минимальные, средние и максимальные значения L для каждого уровня нагрузки аппроксимировали линейными или нелинейными зависимостями так, чтобы они с достаточной точностью характеризовали рассеяние результатов, обусловленное статистической природой прочности хрупких материалов. Для стекла и керамики с низким уровнем трещиностойкости предпочтительным являлось использование полиномиальных кривых аппроксимации, тогда как для более трещиностойкой керамики были характерными линейные аппроксимирующие зависимости (рис. 5). В общем случае уравнение кривой аппроксимации данных записывалось в следующем виде:

$$L = a + b_1 P_f + b_2 P_f^2 + b_3 P_f^3. \tag{3}$$

Таблица 2. Результаты аппроксимаций зависимостей, представленных на диаграммах повреждаемости исследуемых хрупких материалов

Материал	Для значений L	Коэффициенты кривой аппроксимации			
		a	b_1	b_2	b_3
Al ₂ O ₃	минимальных	-0,4350	0,04700	-0,00132	0,0000125
	средних	-0,2080	0,02648	-0,00069	0,0000067
	максимальных	-0,2900	0,03767	-0,00107	0,0000108
SiC HP	минимальных	-0,0030	0,00330	0	0
	средних	0,0058	0,00342	0	0
	максимальных	0,0115	0,00360	0	0
SF-S-TS	минимальных	0,0200	0,00250	0	0
	средних	0,0328	0,00252	0	0
	максимальных	0,0330	0,00295	0	0
ТФ-2	минимальных	0,1480	-0,01710	0,00109	-0,0000133
	средних	0,0410	0,00445	0,00010	0,0000013
	максимальных	0,2210	-0,02721	0,00224	-0,0000400

Коэффициенты полиномиальных зависимостей представлены в табл. 2 для изучаемых керамических материалов и стекла. Оперирование этими коэффициентами дает возможность вычислять значения повреждений кромки при той или иной применяемой нагрузке на индентор.

Предложенный анализ эмпирических данных позволяет получать область возможных значений повреждаемости кромок хрупких материалов при локальном нагружении. Представленный подход можно использовать для экспресс-анализа повреждаемости материалов, позволяющего определить характерный диапазон разрушений их края в зависимости от величины прилагаемой нагрузки.

Выводы

По результатам настоящего экспериментального исследования твердости и закономерностей повреждаемости технической керамики и стекол при локальном нагружении индентором Роквелла методом царапания до скалывания кромки можно сделать следующие выводы:

1. Определены значения твердости при царапании хрупких неметаллических конструкционных материалов типа технической керамики и стекол, учитывающие влияние особенностей локального нагружения, деформирования и разрушения их поликристаллической и аморфной структуры. Для рассмотренных материалов в исследованном диапазоне нагрузок значения твердости на 10...20 % превышают известные литературные данные, полученные стандартными методами с использованием инденторов Виккерса и Кнуппа. Установлены корреляционные взаимосвязи твердости при царапании с модулем упругости Юнга и трещиностойкостью.

2. Для исследованного диапазона нагрузок построены экспериментальные диаграммы двух типов повреждаемости изучаемых материалов, характерных для этапов царапания индентором поверхностей образцов и скалывания их кромок. Установлены корреляционные зависимости меж-

ду твердостью и повреждаемостью технической керамики и стекол, которые имеют практическое значение при выборе материалов на стадии проектирования изделий новой техники.

3. Предложенный способ описания экспериментальных диаграмм с помощью линейных и нелинейных аппроксимирующих зависимостей позволяет определять возможные повреждения поверхности и края образца хрупкого материала при различных уровнях нагрузки. Проведенный анализ эмпирических результатов может использоваться для получения экспресс-оценки повреждаемости материалов как в лабораторных, так и в производственных условиях, для материаловедческих работ по усовершенствованию материалов, служить основой определения их качества при контрольных испытаниях или аттестации.

Список литературы / References

1. Балкевич В.Л. (1984) *Техническая керамика*: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Стройиздат. Balkevich, V.L. (1984) *Technical ceramics*: Manual for Techn. Higher Inst. 2nd Ed. Moscow, Strojizdat [in Russian].
2. Родичев Ю.М. (2005) Конструкционная прочность хрупких неметаллических материалов. *Прочность материалов и конструкций*. Раздел 9.2. Трошенко В.Т. (ред.). Киев, Академперіодика, сс. 955–992. Rodichev, Yu.M. (2005) Structural strength of brittle nonmetallic materials. *Strength of materials and structures*. Chapt. 9.2. Ed. by V.T. Troshchenko. Kiev, Akademperіodika, 955–992 [in Russian].
3. Хасанов О.Л., Бикбаева З.Г., Двиліс Э.С. и др. (2012) *Твердость, микротвердость и нанотвердость наноструктурных керамических материалов*. Томск, Изд-во Томского политехн. ун-та. Khasanov, O.L., Bikbaeva, Z.G., Dvilis, E.S. et al. (2012) *Hardness, microhardness and nanohardness of nanostructural ceramic materials*. Tomsk, TPU [in Russian].
4. Scieszka S.F. (2005) Edge failure as a means of concurrently estimating the abrasion and edge fracture resistance of hard-metals. *Tribology International*, **38**, 834–842.
5. Chai H. (2011) On the mechanics of edge chipping from spherical indentation. *Int. J. Fract.*, **169**, 85–95.
6. Хворостяный В.В. (2014) Механическое поведение керамики и стекла при локальных разрушениях кромок образцов индентором Роквелла. *Пробл. прочности*, **3**, 106–115. Khvorostyani, V.V. (2014) Mechanical behavior of ceramics and glasses at local fractures of edges of samples by Rockwell indenter. *Problemy Prochnosti*, **3**, 106–115 [in Russian].

7. Quinn G.D., Quinn J.B. (2014) A new analysis of the edge chipping resistance of brittle materials. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **35**, 209–224.
8. Хворостяний В.В., Панасенко А.В. (2015) Оценка повреждаемости кромок твердосплавного инструмента при локальных нагружениях. *Сверхтвердые материалы*, **1**, 75–82.
Khvorostianyi, V.V., Panasenko, A.V. (2015) Evaluation of damage of edges of hard alloy tool under local loading. *Sverkhvorydye Materialy*, **1**, 75–82 [in Russian].
9. Гогоци Г.А., Галенко В.И., Мудрик С.П. и др. (2007) Разрушение стекла при краевом скалывании. *Пробл. прочности*, **6**, 103 – 112.
Gogotsi, G.A., Galenko, V.I., Mudrik, S.P. et al. (2007) Fracture of glass at edge chipping. *Problemy Prochnosti*, **6**, 103 – 112 [in Russian].
10. (2010) CEN/TS 834-9. *Advanced technical ceramics – Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature*. Part 9: Method of test for edge-chip resistance. CEN (European Standard).
11. Williams J.A. (1996) Analytical models of scratch hardness. *Tribology International*, **29**, 675–694.
12. Quinn J., Su L., Flanders L., Lloyd I. (2000) «Edge toughness» and material properties related to the machining of dental ceramics. *Machining Science and Technology*, **4**, 291–304.
13. Зборщик А.М. (2008) *Конспект лекций по дисциплине «Новые материалы в металлургии»*. Донецк, ГВУЗ «ДонНТУ».
Zborshchik, A.M. (2008) *Synopsis of lectures on the subject «New materials in metallurgy»*. Donetsk, GVUZ DonNTU [in Russian].
14. Lawn B.R., Marshall D.B. (1979) Hardness, toughness and brittleness: an indentation analysis. *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**, 347–350.
15. Anstis G.R., Chantikul P., Lawn B.R., Marshall D.B. (1981) A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I. Direct crack measurements. *Ibid*, **64**, 533–538.
16. Cook R.F., Pharr G.M. (1990) Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics. *Ibid*, **73**, 787–817.
17. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. (2000) Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *Ibid*, **83**, 461–487.
18. Lee S.K., Tandon R., Readey M.J., Lawn B.R. (2000) Scratch damage in zirconia ceramics. *Ibid*, **83**, 1428–1432.
19. Deriano S., Jarry A., Rouxel T. et al. (2004) The indentation fracture toughness (K_{Ic}) and its parameters: the case of silica-rich glasses. *J. Non-Cryst. Sol.*, **344**, 44–50.
20. Гнесин Г.Г., Осипова И.И., Ронталь Г.Д. и др. (1991) *Керамические инструментальные материалы*. Киев, Техника.
Gnesin, G.G., Osipova, I.I., Rontal, G.D. et al. (1991) *Ceramic tool materials*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
21. (1979) *Сопротивление разрушению*: Учебник для вузов. Писаренко Г.С. (ред.). 4-е изд., перераб. и доп. Киев, Вища школа.
(1979) *Breaking strength*: Manual for higher education inst. Ed. by G.S. Pisarenko. 4th Ed., Kiev, Vyshcha Shkola [in Russian].
22. Андриевский Р.А., Ланин А.Г., Рымашевский Г.А. (1974) *Прочность тугоплавких соединений*. Москва, Металлургия.
Andrievsky, R.A., Lanin, A.G., Rymashevsky, G.A. (1974) *Strength of refractory compounds*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
23. Хворостяний В.В. (2016) Оценка твердости керамических материалов при царапании поверхности образцов индентором Роквелла. *Сб. матер. науч. чтений им. чл.-корр. РАН И.А. Одинг «Механические свойства современных конструкционных материалов»*, Москва, 6–7 сентября 2016 г., сс. 136–137.
Khvorostianyi, V.V. (2016) Evaluation of hardness of ceramic materials at scratching of sample surface by Rockwell indenter. In: *Proc. of I.A. Oding Sci. Lectures, RAS, Mechanical Properties of Modern Structural Materials (Moscow, 6-7 September 2016)*, 136–137 [in Russian].

ОЦІНКА ТВЕРДОСТІ ТА ЛОКАЛЬНОЇ ПОШКОДЖУВАНOSTІ КЕРАМІКИ ТА СКЛА МЕТОДОМ ДРЯПАННЯ ДО ВІДКОЛЮВАННЯ КРОМКИ

В.В. Хворостяний, Ю.М. Родічев, О.Б. Сорока

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2.

E-mail: khvorostianyi.v.v@ipp.kiev.ua

Наведено результати експериментального дослідження закономірностей пошкоджуваності крихких матеріалів, таких як скло та кераміка при локальному навантаженні методом дряпання індентором Роквелла поверхні зразка до відколювання кромки. Визначено значення твердості при дряпанні досліджуваних крихких матеріалів. Показано, що твердість при дряпанні перевищує значення твердості при індентуванні стандартним гострим індентором переважно на 20 %. Представлено залежності пошкоджуваності поверхні від навантаження, а також між твердістю при дряпанні, пошкоджуваністю, модулем пружності та критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень. Запропоновано спосіб використання експериментальних діаграм пошкоджуваності крихких матеріалів для достовірного визначення ступеню їх локального руйнування в залежності від рівня навантаження. Бібліогр. 23, табл. 2, рис. 5

Ключові слова: кераміка, скло, дряпання до відколювання кромки, твердість, відстань руйнування, діаграми пошкоджуваності

ASSESSMENT OF HARDNESS AND LOCAL DAMAGE OF CERAMICS AND GLASS BY THE METHOD OF SCRAPING UP TO CHIPPING OUT

V.V. Khvorostianyi, Y.M. Rodichev, O.B. Soroka

G.A. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevska Str., 01014, Kyiv, Ukraine.

E-mail: khvorostianyi.v.v@ipp.kiev.ua

The paper gives the results of experimental study of the regularities of damage in such brittle materials as glass and ceramics at local loading by the methods of sample surface scraping by Rockwell indenter up to chipping out. Hardness values at scraping of the studied brittle materials were determined. It is shown that hardness at scraping is higher than the hardness values at indentation with a standard sharp indenter, mostly by 20%. Dependencies of surface damage on load, as well as those between hardness at scraping, damage, modulus of elasticity and critical stress intensity factor, are presented. A method of application of experimental diagrams of brittle material damage for reliable determination of the degree of their local fracture, depending on the stress level is proposed. 23 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: ceramics, glass, scraping up to chipping out, hardness, destruction distance, damage diagrams

Поступила в редакцію

27.06.2019

КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2019»: ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

Ежегодно, на протяжении двух десятков лет, Ассоциация «ОКО» проводит в Киеве конференцию-выставку «Неразрушающий контроль», приглашая принять участие в мероприятии ученых и исследователей в области неразрушающего контроля (НК), известных экспертов, специалистов этого направления, представителей предприятий и организаций, производственные и рабочие процессы которых предполагают использование методов НК.

Участники Конференции «Неразрушающий контроль-2019».

В конференц-зале Ассоциации «ОКО» собрались участники, приехавшие из ближнего зарубежья и разных областей Украины, в их числе: председатель Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, д.т.н., профессор Троицкий В.А.; д.т.н., проф., член правления Украинского общества НКДТ Белокур И.П.; д.т.н. Учанин В.Н.; сотрудники ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины к.ф-м.н. Зельниченко А.Т. и к.т.н. Бондаренко Ю.К.; представители железных дорог Литвы, Латвии, Эстонии и Молдовы.

Также в конференции приняли участие представители Криворожской, Ладыжинской, Кураховской и Приднестровской ТЭС, Ровенской, Запорожской, Чернобыльской и Хмельницкой АЭС, ГП НАЭК «Энергоатом», ПАО «Укрзалізниця», КП «Киевтеплоэнерго», АК «Киевводоканал», ООО «Карпатнефтехим», ГП «Одесский авиационный завод», Кременчугского сталелитейного завода, Одесской и Южной железных дорог, ПАО «Запорожсталь», ГП «Антонов» и многих других предприятий и учреждений.

Ход и ключевые моменты Конференции.

На проведение мероприятия было выделено два дня – 15 и 16 мая. Форум открылся приветственными словами генерального директора Ассоциации «ОКО», председателя оргкомитета Конференции Луценко Татьяны Михайловны, также собравшихся приветствовал председатель Украинского общества неразрушающего контроля Владимир Александрович Троицкий.

На сегодня Ассоциация «ОКО» экспортирует продукцию в более чем 50 стран мира. Присутствующим было интересно узнать о стратегии ее развития. Т.М. Луценко провела презентацию, в которой рассказала о шагах, предпринятых компаниями Ассоциации за время, прошедшее с прошлой Конференции: участии в международных и региональных выставках, проведении за рубежом презентаций для потенциальных клиентов, обучающих семинаров и тренингов.

Работа Конференции продолжилась докладами, которые подготовили ведущие специалисты УкрНИИ НК, ООО «Промприлад» и ООО «Ультракон-Сервис» – производственных компаний, входящих в Ассоциацию «ОКО» и демонстрацией оборудования.

Мищенко В.П., начальник отдела технологий НК УкрНИИ НК, представил доклад о накопленном опыте разработки оборудования НК для железнодорожной отрасли; Верютин М.В., инженер-технолог НПФ «Промприлад», рассказал об особенностях вихретоковых преобразователей и современных вихретоковых дефектоскопах Eddyson C (CL); Галаненко Д.В., к.т.н., ведущий технолог по УЗК УкрНИИ НК, подготовил два доклада по новым современным разработкам ультразвуковых дефектоскопов Sonoson B (BL), TOFT метода и системы «TOFT-man» как средства для повышения качества и производительности проведения ультразвукового контроля сварных соединений.





Работа по секциям.

После пленарного заседания работа конференции была продолжена в четырех секциях:

- «Железная дорога (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство)», руководители Луценко Т.М. и Мищенко В.П.;
- «Энергетика, Нефтегазовая и Химические отрасли», руководитель Галаненко Д.В.;
- «Авиастроение и техническое обслуживание летательных аппаратов», руководитель Верютин М.В.
- «Металлургия, машиностроение», руководитель Свистун А.В.

В каждой из секций был представлен ряд докладов по актуальным вопросам соответствующей отрасли, прошли дискуссии с обсуждением проблем и задач НК.



Культурная программа.

Повестка первого дня Конференции была очень насыщенной, поэтому организаторами была предложена культурная программа и вечер отдыха. Традиционно теплая майская погода, цветущие каштаны, свежесть весенней зелени способствовали приятной прогулке. Затем участников Конференции ждал дружеский ужин, во время которого, помимо развлекательной программы (подготовленной коллективами компаний Ассоциации «ОКО»), входили профессиональные конкурсы, в которых участники, с завязанными глазами, должны были продемонстрировать свою квалификацию.



Первый конкурс был посвящен вихревоковому методу, второй – ультразвуковому. Участник, у которого были завязаны глаза, руководствуясь подсказками своего помощника, должен был выполнить задание – найти дефект на предложенном образце. Зрители следили за ходом конкурса на большом экране. После судейской проверки выигравшая команда получила приз – особую «Контактную жидкость» от Ассоциации «ОКО».

Спасибо, «Неразрушающий контроль-2019»!

Киевская конференция НК – это не только форум для обсуждения различных вопросов данного направления и демонстрации нового оборудования, а также место встречи коллег, ученых, разработчиков – профессионалов своего дела. Желание встречаться, делиться опытом, сообща решать сложные вопросы позволили конференции-выставке «Неразрушающий контроль-2019» пройти на очень высоком уровне.

Ассоциация «ОКО» благодарит всех участников за их вклад и с гордостью отмечает постоянно растущий интерес, благодаря которому профессионалов в области НК становится больше, а качество и безопасность оборудования, соответственно, повышаются.

По сложившейся традиции в мае 2020 г. будет проводиться следующая конференция-выставка «Неразрушающий контроль». Ассоциация «ОКО» надеется увидеть постоянных гостей и встретить новых молодых специалистов, энтузиазм и идеи которых будут способствовать дальнейшему развитию неразрушающего контроля в Украине и за ее пределами.

О. Дудка, Ю. Артюх, Ассоциация «ОКО»



НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ НА ШОСТІЙ МІЖНАРОДНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ «МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ЦІЛІСНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ»

3-6 червня 2019 р. у Національному університеті «Львівська політехніка» відбулася шоста Міжнародна конференція «Механіка руйнування матеріалів та цілісність конструкцій» («Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity» FMSI 2019). Організатори заходу – Європейське товариство з цілісності конструкцій (ESIS), Українське товариство з механіки руйнування, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України (ФМІ), НУ «Львівська політехніка». Голова оргкомітету конференції – академік НАН України В.В. Панасюк, заступники голови – академік НАН України Л.М. Лобанов та професор Ю.Я. Бобало. У конференції взяли участь понад 60 учасників з 14 країн (Аргентина, Греція, Індія, Іспанія, Італія, Канада, Китай, Мексика, Польща, Португалія, США, Угорщина, Україна, Франція).

Основними напрямками роботи конференції були:

- механіка руйнування та міцність матеріалів;
- корозійне розтріскування;
- неруйнівний контроль (випробування) конструкцій;
- прикладна механіка.

Вперше за історію проведення цієї конференції проблеми неруйнівного контролю (НК) було заслухано на окремій секції, що пов'язано зі створенням в рамках ESIS технічного комітету ESIS-TC17 «Non-Destructive Evaluation» (голова П. Трампс). Міжнародну спільноту НК на конференції крім Петера Трампса представляв президент Міжнародної Академії НК Джузеппе Нардоні.

На пленарному засіданні було заслухано доповідь «To the problem of the subsurface defects detection: theory and experiment» (Z. Nazarchuk, L. Muravsky, D. Kuryliak, *Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU*), в якій представлено новий підхід до вирішення проблеми виявлення підповерхневих дефектів у багатошарових панелях з композитних матеріалів. Він полягає у поєднанні методів спекл-метрології (електронної спекл-інтерферометрії) та динамічних спеклів, які генеруються гармонічними ультразвуковими хвилями. Для реалізації запропонованого підходу створено макет оптико-цифрової системи, яка є значно простішою порівняно з інтерферометричними системами. Надійність запропонованого підходу підтверджена результатами експериментів з композитними панелями з внутрішніми тестовими дефектами.

На спеціальному секційному засіданні конференції «Неруйнівний контроль» (співголови акад.

З.Т. Назарчук та проф. П. Трампс) було заслухано 10 доповідей.

У доповіді «Role and importance of NDE in nuclear power plant life extension» (P. Trampus, *University of Dunaujvaros, Hungary*) висвітлено роль НК у забезпеченні довготривалої працездатності обладнання атомної енергетики на прикладах, взятих з досвіду експлуатації атомної електростанції Пакш (Угорщина). Методи НК охоплюють ультразвукові та вихрострумові випробування критичних областей та підсистем реакторної зони високого тиску, парогенератора та деяких паропроводів. Показано, що результати НК сприяють аналізу процесів старіння, який є абсолютно необхідним для отримання ліцензії на роботу за межами розрахункового строку служби обладнання.





Засідання секції неруйнівного контролю

Три доповіді були присвячені питанням розвитку акустико-емісійного контролю. У першій з них «Method of acoustic emission in delayed fracture mechanics of structural materials» (Z. Nazarchuk, O. Andreykiv, V. Skalskyu, D. Rudavskyu, *Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, Ivan Franko National University of Lviv*) показано можливості методу акустичної емісії (АЕ) досліджувати кінетику уповільненого руйнування конструкційних матеріалів, визначати періоди зародження макротріщин та їх докритичного росту. Запропоновано підхід для побудови кінетичних діаграм високотемпературного повзучого росту тріщин, який полягає спочатку у побудові кінетичної діаграми повзучого росту тріщини за параметрами АЕ, а потім у переході від останньої до основної кінетичної діаграми за механічними параметрами з використанням теоретично встановленого перетворення.

Друга доповідь «AE technology in continuous monitoring of hightemperature pipelines at heating power plants» (B. Paton, L. Lobanov, A. Nedoseka, S. Nedoseka, M. Yaremenko, J. Gereb, Yu. Gladyshev, V. Beshun, A. Bychkov, A. Gaidukevich, *Paton Electric Welding Institute of NASU, VD2 (Hungary), SVP «Kievskii TPP» PJSC «Kievenergo»*) була присвячена застосуванню методу АЕ для моніторингу стану трубопроводів теплових електростанцій з прогнозуванням руйнівного навантаження. Представлено результати розробки системи неперервного моніторингу трубопроводів пароперегрівача енергоблоку № 1 на Київській ТЕЦ-6. Створена методика дозволяє на основі даних АЕ визначати руйнівне навантаження конструкційного матеріалу. Представлено схему моніторингу та особливості практичного застосування системи. Методика дозволяє визначати координати ділянки обладнання з мінімальним значенням руйнівного навантаження. Наявність віддаленого доступу забезпечує авторський нагляд за роботою системи через Інтернет.

У доповіді «The methodology of evaluation and monitoring of the fatigue fracture at macrocrack initiation stage» (R. Chepil, O. Stankevych, O. Ostash, V. Klym, *Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU*) на основі застосування уніфі-

кованої моделі втомного руйнування розглянуто питання визначення втомної довговічності елементів конструкцій із вирізами. Показано, що період зародження втомної макротріщини, який в основному визначає довговічність конструкційних елементів із високоміцних матеріалів за дії циклічного навантаження, можна прогнозувати за запропонованою базовою кривою втоми для зразків з концентраторами, отриманою на стадії зародження макротріщини. Показано можливість моніторингу цього процесу (накопичення мікропошкоджень, утворення системи мікротріщин і зародження макротріщини) за параметрами АЕ сигналів. Встановлено, що під час зародження макротріщини у зразках із вирізами з алюмінієвого сплаву Д16АТ енергетичний параметр сигналів АЕ збільшується від 0,01 до 0,18.

Актуальні питання моніторингу зносу елементів трансмісії літальних апаратів розглянути у доповіді «Monitoring of the wear of aircraft transmission toothed wheels by the FAM-C and FDM-A methods» (A. Gębura, S. Kłysz, T. Tokarski, *Air Force Institute of Technology, University of Warmia and Mazury, Technical Sciences Department, Poland*). Ця проблема є особливо актуальною стосовно вертольотів, оскільки неконтрольоване зношування зубчастих коліс їх трансмісії у процесі експлуатації може призводити до аварій. Для запобігання цьому авторами запропоновані розроблені ними нові методи діагностики FAM-C та FDM-A.

У доповіді «Analysis of rotary mechanism fault features on the base of the spectral structure for vibration stochastic recurrence» (I. Javorskyj, R. Yuzefovych, P. Semenov, P. Kurapov, *Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, UTP University of Science and Technology, Poland, Lviv Polytechnic National University, Odessa National Maritime University*) розглянуто питання вібродіагностики обертальних механізмів. Представлено результати розробки методу виявлення пошкоджень у таких пристроях на основі спектрального аналізу періодичних нестационарних випадкових сигналів.

У доповіді «The String Model: a new interpretation of the metallic structures and its connected physical phenomena» (G. Nardoni, W. Rummel, P. Trampus, *Academia NDT International, Brescia, Italy*) розглянуто новий підхід до пояснення структури металів залежно від фізичних явищ, які в них відбуваються, на основі струнної моделі. Представлено принципи даної теорії та показано як струнна модель може пояснювати поведінку структури металу залежно від дії напружень, магнітного поля, процесів гартування, зміцнення тощо.

Актуальній проблемі визначення залишкових напружень у зварних конструкціях була присвячена доповідь «Determination of residual stresses by



Виступає президент Міжнародної академії НК Джузеппе Нардоні (Італія)

laser shearography method» (L. Lobanov, V. Savitsky, Paton Electric Welding Institute of NASU). В ній показано переваги оптичних методів (голографії, оптичної інтерферометрії, спекл-інтерферометрії та цифрової кореляції зображень) для вирішення даної проблеми порівняно із стандартним методом, який передбачає свердлення отворів і використання засобів тензометрії. Серед оптичних методів на думку авторів найбільш перспективним є метод лазерної широгографії, який на відміну від голографічного та спекл-інтерферометричного методів не вимагає спеціальної віброізоляції. Проведені експерименти та результати моделювання показали, що поєднання лазерної широгографії з методом отворів дозволяє визначати залишкові напруження у виробничих умовах з високою точністю.

Значне місце у роботі секції було приділено розвитку електромагнітних методів НК. В доповіді «Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment» (V. Uchanin, O. Ostash, Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU) розглянуто питання оцінювання механічних характеристик матеріалів на основі вимірювання питомої електропровідності (ПЕП) алюмінієвих сплавів (АС) вихрострумовим методом та вимірювання коерцитивної сили (КС) феромагнітних сталей структуроскопами типу КРМ-Ц. Принциповою особливістю роботи є визначення кореляційних залежностей параметрів матеріалу, які можна визначити методами НК, з характеристиками циклічної тріщиностійкості матеріалу, які необхідні для визначення залишкового ресурсу конструкцій. Досліджено кореляційні зв'язки між ПЕП та механічними характеристиками деградованих АС авіаційних конструкцій за великих термінів експлуатації, а також між ПЕП та механічними характеристиками

АС зварних з'єднань. Встановлено кореляційні залежності між змінами КС і змінами характеристик циклічної тріщиностійкості сталей 12Х1МФ та 15Х1М1Ф паропроводів теплових електростанцій в процесі їх тривалої експлуатації. Показано можливість оцінювання напруженого стану елементів корпусів суден на основі вимірювання КС. Представлено дослідження з магнітоанізотропного методу визначення напруженого стану і результати його практичного застосування.

У доповіді «Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques» (V. Uchanin, G. Nardoni, Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, I&T Nardoni Institute, Italy) висвітлені питання застосування вихрострумових перетворювачів (ВСП) подвійного диференціювання для виявлення тріщин у конструкціях із феромагнітних сталей. Подана докладна інформація про властивості та переваги вказаних ВСП. Представлено результати з виявлення тріщин у деталях в лопатках і отворах газових турбін. Ще одним із прикладів використання даного типу ВСП є контроль трубних поковок. При цьому окремі ВСП подвійного диференціювання використовують в якості елементів у багатоелементних ВСП (типу EDDYLINE). Такі ВСП у комбінації із дефектоскопом ELOTTEST B300 використовують для виявлення тріщин у трубних поковках, що дозволяє суттєво збільшити продуктивність НК.

Проблемі визначення компонентів перехідного опору, необхідного для контролю протикорозійного захисту і діагностики технічного стану підземних трубопроводів (ПТ), була присвячена доповідь «Determination of components of transient resistance of underground pipeline» (R. Dzhala, V. Dzhala, R. Savula, O. Senyuk, B. Verbenets, Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, Lvivtransgaz). Представлено нові можливості визначення розподілу перехідного опору труба-земля вздовж траси та його компонентів (питомих опорів ізоляції, ґрунту, поляризації) на ділянках ПТ за безконтактними вимірами струмів та контактними вимірами потенціалів із урахуванням встановлених зв'язків між компонентами електричного поля біля ПТ. На основі цього можна оцінювати швидкість корозії ПТ і підземних металевих споруд.

За поданими матеріалами видано збірник тез доповідей. Повні тексти доповідей після рецензування будуть опубліковані у спеціальному випуску міжнародного журналу «Procedia Structural Integrity» (видавництво Elsevier).

Член комітету TC17 ESIS, д.т.н. В.М. Учанін,
к.т.н. В.Г. Рибачук

72-а ЩОРІЧНА АСАМБЛЕЯ МІЖНАРОДНОГО ІНСТИТУТУ ЗВАРЮВАННЯ



Цього разу головна подія року в галузі електрозварювання 72-а щорічна Генеральна асамблея Міжнародного інституту зварювання та Міжнародної конференції відкрила столиця Словаччини – Братислава.

Протягом шести робочих днів (7–12 червня 2019 р.), 789 учасників з 45 країн світу мали можливість прослухати 70 доповідей і 92 презентації, провести відповідні регламенту голосування та вибори, та поздоровити лауреатів професійних нагород за досягнення минулих років в галузі зварювання.

За багаторічною традицією Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України як член Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) взяв участь в роботі форуму. Делегацію очолював представник Інституту в МІЗ учений секретар І.М. Клочков. Разом із ним в роботі форуму взяли участь начальник відділу, кандидат технічних наук М.В. Юрженко, кандидати технічних наук С.І. Мотруніч та С.В. Шваб.

В цьому році МІЗ вирішив відзначити внесок в розвиток зварювання та споріднених технологій наступних вчених:

- медаль Уолтера Едстрьома, що заснована шведською делегацією, отримав пан Мін-Чул Хонг (Корея);
- знаки дійсних членів МІЗ (за участь в роботі МІЗ протягом 10 та більше років) отримали почесний професор Хорст Сержак (Австрія), професор Карл Кросс (США), доктор Річард Далбі (Велика Британія), професор Леіф Карлссон (Швеція), професор Америкіо Скотті (Швеція);
- нагороду Артура Сміта, що заснована делегацією Великої Британії, отримав доктор Кота Кадої (Японія);
- нагороду Кріса Смолбона, що заснована членами МІЗ від Болгарії, Греції, Румунії та Сербії, отримав пан Рей Шук (США);

- медаль Томаса, що заснована Американським товариством зварювання, отримав пан Дуглас Кац (США);
- нагороду Йосіаки Арата, що заснована делегацією Японії, отримав професор Леіф Карлссон (Швеція);
- нагороду Халіла Кая Гедіка, що заснована делегацією Туреччини, отримав пан Девід Фінк (США);
- нагороду за кращу у 2018 р. наукову друковану роботу в галузі зварювання, що заснована МІЗ, отримав доктор Вахід Хоссейні (Швеція);
- приз Анрі Граньона, що заснований Французьким інститутом зварювання, отримав доктор Джин-Сонг Чен (США), доктор Хісаія Комен (Японія), дипломований інженер Александр Ніцше (Німеччина) та доктор-інженер Йонас Хенсель (Німеччина);
- приз Уго Гуеррера, що заснував Італійський інститут зварювання, отримала пані Клаудія Паван (Італія).

Вже багато років поспіль ІЕЗ ім. Є.О. Патона вручає одну з найпочесніших нагород цього міжнародного форуму – Приз Євгена Патона. Цей рік, як і завжди, спільноті в галузі електрозварювання було висунуто багато претендентів. Виборів же



Делегація на МІЗ від ІЕЗ ім. Є.О. Патона



Проф. Девід Олсон – лауреат Приза Євгена Патона за 2019 р.

Приз професор зі Сполучених Штатів Америки Девід Олсон за свій внесок в розвиток передових технологій, матеріалів та обладнання для зварювання та споріднених процесів.

Українські учасники Асамблеї, як і завжди, поїхали в Братиславу не з порожніми портфелями. Поїхали не лише, щоб почути інших, але й представити на розсуд фахівців майже з усього світу зварювання свої напрацювання та здобутки.

На об'єднаному засіданні комісії XI (Трубопроводи та посудини, які експлуатуються під тиском) та підкомісії IX-С (Поведінка металів, які зварюються) було представлено доповідь на тему «Solid experience in the use of continuous monitoring systems pipeline thermal station during the operation on the basis of SHM technologies». До її авторського колективу входять Лобанов Л.М., Недосека А.Я., Недосека С.А. та Мотруніч С.І. Доповідь привернула увагу багатьох учасників до ідей та технологій акустично-емісійної діагностики матеріалів та конструкцій, що використовувалася в дослідженнях.

На комісії XIII (Опір втомі зварних елементів і конструкцій) І.М. Клочков та С.І. Мотруніч представили доповідь «High cycle fatigue behaviour of thin sheet joints of aluminium-lithium alloys under constant and variable amplitude loading». І вже на міжнародній конференції ними ж була представлена стендова доповідь «Fatigue life of thin sheet joints of aluminum-lithium alloys produced by FSW and TIG welding technologies».

З доповіддю на Комісії XVI (Полімерні з'єднання та адгезивні технології) виступив Максим Юрженко. Тема доповіді – «Structural studies of the welded joints and hypothesis of the welding mechanism of plastics». Він же виступив на міжна-

родній конференції із доповіддю «Novel theory of plastics welding and its application».

Голова Ради наукової молоді ІЕЗ ім. Є.О. Патона С.В. Шваб взяв участь в роботі WG-RA (Робоча група з питань діяльності в регіонах), виступивши із доповіддю про проведення 19–22 травня 2020 р. в Києві Міжнародної конференції молодих професіоналів зі зварювання та споріднених технологій (YPIC) разом із WRTYS–2020. Ця доповідь була також представлена на засіданні TGYL (Цільова група молодих лідерів).

З початку своєї діяльності у 1948 р. Міжнародний інститут зварювання відіграє провідну роль в розвитку зварювання та об'єднанні діяльності членів цієї організації тепер вже з 53 країн світу. Свої функції в МІЗ виконують робочі групи та Міжнародна рада з ліцензування. Тому значення генеральних асамблей членів МІЗ для зростання, актуальності та динамічності цієї організації важко переоцінити.

Цього року закінчився контракт між МІЗ та Institut de Soudure (Франція). З 1 січня 2020 р. виконавчий офіс буде знаходитися в італійському Istituto Italiano della Saldatura (IIS) Group, а обов'язки головного виконавчого директора від пані Сесіль Майер перейдуть до пана Лука Кости.

Засідання 75 робочих груп відбулось в межах засідань 23 комісій, і проходили вони три дні. Три дні інтенсивних засідань, зустрічей, презентацій тощо. Протягом цього часу робочі групи прийняли 160 рішень, зокрема 144 рішення щодо публікацій у виданні «Welding in the World» (Зварювання в світі). Важливими є також прийняті сім рішень, що затверджені Міжнародною організацією стандартизації (ISO), в галузі електрозварювання та суміжних технологій на підтримку розвитку промисловості.

Підтримка молодих професіоналів, які працюють в галузі електрозварювання, є одним з головних завдань МІЗ. В Братиславі спеціальні заходи були організовані для 144 молодих науковців і студентів. Крім того, вони мали можливість представити свої ідеї та обмінятися думками на засіданнях робочих груп. Найкращі виступи були відзначені призами, зокрема призами Словацької академії наук. Один з призів отримав представник ІЕЗ ім. Є.О. Патона С.І. Мотруніч.

72-а щорічна Генеральна асамблея МІЗ завершила свою роботу. Братислава передала прапор організаторів Сінгапуру, де 19–24 липня 2020 р. відбудеться 73-я щорічна Генеральна асамблея МІЗ. Потім форум прийматиме італійська Генуя, а в 2022 р. головні події в галузі електрозварювання відбудуться в Токіо.

С. Мотруніч, канд. техн. наук



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ»

В период с 9 по 13 сентября 2019 г. в Одессе на базе отеля «Аркадия» состоялась IX Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» (LTWMP-2019), организованная Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» и Международной Ассоциацией «Сварка».

В работе конференции приняло участие более 60 ученых и специалистов из Украины, Словакии, Германии, Беларуси и Китая. Конференция была организована в виде пленарных и стендовых сессий, рабочие языки конференции русский, украинский и английский (был обеспечен синхронный перевод докладов). Во время пленарных и стендовых сессий было заслушано 37 докладов.

Открыл конференцию Председатель программного комитета конференции, заместитель директора ИЭС им. Е.О. Патона академик И.В. Кривцун. В своем выступлении он отметил, что для участия в конференции заявлены доклады по лазерной тематике, гибридным и 3D технологиям, а также доклады по электронно-лучевым технологиям в сварке и в специальной электрометаллургии. Академик И.В. Кривцун также отметил роль парогазового канала в лучевых технологиях при формировании сварных соединений и роль синергетического эффекта в гибридных технологиях.

Вне программы конференции выступил директор Центра химических технологий Академии инженерных наук А.П. Мухачов (г. Каменское) с информацией о направлениях деятельности центра по восстановлению производства в Украине гафния, циркония, ниобия и молибдена в установках электронно-лучевого переплава.

А.А. Полишко (ИЭС им. Е.О. Патона) провела презентацию конференции молодых ученых и специалистов YPIC/WRTYS 2020 «Young Professionals International Conference on Welding and Related Technologies», 19-22 мая 2020, Киев (<https://ypic2020.com>) и пригласила ученых, специалистов и руководителей предприятий к участию в ней в качестве докладчиков, слушателей и спонсоров.

В конференции также приняли участие без докладов представители ряда промышленных предприятий Украины из Киева, Днепра, Запорожья, Харькова,



Выступление академика И.В. Кривцуна при открытии конференции

Кривого Рога, Каменского, использующие в производственном цикле лазерные и лучевые технологии.

По завершению конференции был проведен Круглый стол «Новые разработки в области 3D лучевых технологий». Во время проведения круглого стола обсуждались актуальные проблемы развития лучевых сварочных технологий применительно к получению трехмерных изделий из различных металлических материалов и были продемонстрированы готовые изделия, полученные с помощью лазерного 3D прототипирования (ООО «Лазерные аддитивные технологии Украины») и в электронно-лучевых установках (ЧАО «НВО Червона Хвиля», ИЭС им. Е.О. Патона).

К концу 2019 г. будут изданы труды конференции LTWMP-2019. Труды предыдущих восьми конференций LTWMP можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

Доброжелательная, гостеприимная, творческая обстановка конференции способствовала развитию полезных дискуссий, установлению деловых контактов. Участники конференции выразили единодушное одобрение предложению о проведении следующей, десятой Международной конференции по лучевым технологиям в сварке и обработке материалов (LTWMP-2021) в сентябре 2021 г. в Одессе, Украина.

Организационный комитет конференции LTWMP-2019 выражает благодарность и признательность компаниям Червона Хвиля, Технологии высоких энергий, Китайско-украинскому институту сварки им. Е.О. Патона, Центру «Титан» ИЭС, Центру электронно-лучевой сварки ИЭС и Международному центру электронно-лучевых технологий ИЭС за оказанную помощь в проведении конференции.

А.Т. Зельниченко, канд. физ.-мат. наук.