

UDC 621.43

R. Huang¹, Ph.D., assoc. professor

J. Xu¹, Ph.D., professor

K. Grinkevych², Ph.D., senior researcher

G. Tsybanov³, Dr.Habil, senior researcher

I. Tkachenko²

¹*Dalian Maritime University*

(Dalian, China, rxhuang@dlnu.edu.cn)

²*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine*

(Kyiv, Ukraine, kevich@ukr.net)

³*G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NAS of Ukraine*

(Kyiv, Ukraine, g.v.tsybanov@ipp.kiev.ua)

EVALUATION OF THE SURFACE COMPATIBILITY OF PISTON GROUP PARTS WITH DIFFERENT COATINGS USING THE CYCLIC INDENTATION METHOD

The development and use in the engine industry of modern types of materials and coatings requires the establishment of an optimal combination of durability, mechanical strength and wear resistance under dynamic conditions, among other things. In this regard, in this study, experiments were carried out to determine the tribotechnical characteristics of the materials of the piston ring and cylinder liner with different coatings using both the traditional bench tests technique and with the imposition of a cyclic load (CL) [1]. The latter of the techniques makes it possible to bring the conditions of friction in contact closer to operational ones due to the presence of vibrations during engine operation.

Under study next surfaces of diesel engine parts was investigated: rings (materials marked as R_A - cast iron with vermicular graphite ChVG30 with $CrAl_2O_3$ coating, R_b – alloy steel 20CrN with CrN coating) and cylinders (C_d – low-alloy cast iron, corrosion-resistant ChNHMD, and C_c – white iron modified with boron). Samples were cut directly from the rings and cylinder liners.

The results of bench tests of pairs R_a/C_c and R_b/C_c in a wide range of temperatures and loads showed an insignificant difference in tribotechnical characteristics. When the ring was in contact with another material of cylinder liner (R_a/C_d) the scuffing was observed there. Wear of liner surface in R_a/C_d contact is about 20 times higher than R_b/C_d . One hand the topography of friction tracks confirms the same mechanism of degradation in the bench tests and CL tests. Other hand the CL test sensibility is higher that under the bench tests. The results obtained prove the possibility using the wear parameters under short term test with cyclic loading. In addition, they can be used to assess the compatibility of friction pairs and calculate the durability according to the criterion of limit wear.

1. Nevshupa R. Roman E., Grinkevych K., Martinez I. TriDes – a new tool for the design, development and non-destructive evaluation of advanced construction steels. *Materiales de Construcción*. 2016. Vol. 66. No. 324. e099. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.09815>

УДК 539.3

А.В. Бялонович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Л.Е. Матохнюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

А.Н. Майло, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

С.Г. Писаренко

*Институт проблем прочности имени Г.С. Писаренка НАН Украины
(Киев, Украина, abyalonovich@gmail.com)*

АНАЛИЗ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ НАКОПЛЕННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

В процессе многоциклового нагружения образца металла на стадии, предшествующей зарождению усталостной трещины, происходит непрерывное накопление повреждений. Данные повреждения имеют локальный характер, распространены как в объеме материала, так и на поверхности образца. В связи с особенностями кинетики повреждений на поверхности они накапливаются более интенсивно, чем в основном объеме [1]. Поэтому, как правило, усталостная трещина зарождается именно в поверхностном либо подповерхностном (наблюдается при гигацикловой усталости) слоях. Этот факт не относится к изделиям с модифицированной поверхностью, например при внесении остаточных сжимающих напряжений методом наклепа. Во всех остальных случаях для анализа накопления усталостных повреждений имеет смысл анализировать поверхностный слой материала.

На стадии накопления усталостных повреждений (до появления макротрещины) анализ изображений структуры с целью определения степени поврежденности материала является довольно сложной задачей. Это связано с локальностью изменений структуры – основная часть материала на оптическом изображении остается практически такой же, как и в исходном состоянии [1]. Соответственно при использовании глобальных признаков изображений, полученных методами компьютерного зрения, наблюдается незначительное изменение структуры при накоплении повреждений, что иногда вполне сравнимо с погрешностями, связанными с получением цифровых изображений структуры. Поэтому наряду с анализом цифровых оптических снимков структуры поверхности материала используются другие методики, отражающие изменение поверхности в процессе накопления усталостных повреждений. В данной работе предложен метод анализа цифровых изображений структуры спеклов.

На деформированной поверхности металла формируется рельеф, обусловленный развитием сдвигов плоскостей скольжения. Система развитых полос скольжения образует на поверхности деформационный рельеф, структура которого характерна для каждого этапа нагружения. При облучении поверхности когерентным пучком света формируется поле спеклов с

дискретным распределением интенсивности рассеянного излучения [2]. Отраженный от неоднородной поверхности луч когерентного источника света несет информацию о текущем состоянии физико-механических свойств материала. Параметры распределения спекл-структур на поверхности могут использоваться в качестве характеристики поврежденности материала, которой соответствует микрорельеф со случайным распределением дискретных деформаций. Изменение структуры рельефа находит отражение в параметрах распределения деформационных дефектов, статистические характеристики которых позволяют контролировать изменение распределения дискретных деформаций на поверхности материала в процессе нагружения.

Методы анализа цифровых изображений применяются в различных областях, где присутствует знакопеременное нагружение. Например, по данным работ [3, 4] проведен анализ цифровых изображений с целью определения ресурса железнодорожных рельсов. Фрактографический анализ является нетривиальной металлографической задачей и достоверный результат требует от оператора затрат значительных квалификационных ресурсов.

В работе [5] предложена методика, которая на основе анализа цифровых снимков поверхности разрушения позволяет получить некоторые количественные характеристики, что может упростить задачу фрактографического анализа. Автоматическое определение усталостных трещин на поверхности также является актуальной задачей автоматического неразрушающего контроля. В работе [6] авторы предложили метод распознавания трещины на оптическом изображении, используя методы компьютерного зрения. Не менее актуальным является анализ микротрещин [7].

В работе [8] предложена методика анализа цифровых изображений, которая основана на дискретно двумерном Фурье-преобразовании. Данная методика показала неплохие результаты для многоцикловой области усталости. Однако при напряжениях, характерных для разрушений на базе нагружения 10^6 циклов, достоверность определения остаточного ресурса резко падает. Это связано с тем, что при небольших нагрузках изменения оптического изображения структуры становятся настолько локальными и количество этих локальных мест настолько малым, что методика с трудом отличает изображения поврежденного материала от материала без повреждений. В связи с тем, что оптическое изображение при этом практически не меняется, данный подход оказывается неэффективным.

В данной работе использована сверточная нейронная сеть для классификации спекл-изображений. Визуальный анализ таких изображений представляется крайне затруднительным, так как нельзя выделить какой-то конкретный объект и визуально определять его характеристики.

Глубокие сверточные нейронные сети предназначены для обработки данных, у которых топология подобна сетевой. Они широко используются для распознавания объектов на изображениях и диагностики закономерностей данных временных рядов, а также для классификации данных датчиков [9].

В процессе эксперимента, проведенного в данной работе, были получены спекл-изображения поверхности ненагруженного материала, а также

после воздействия переменной нагрузки. Данные изображения были разбиты на две группы – изображения для тренировки модели нейронной сети и изображения для проверки качества тренировки.

Проведена тренировка и проанализированы результаты для нескольких структур нейронных сетей. В результате построена и обучена модель, которая показала с вероятностью определения не ниже 90 %, к какому классу относится спекл-изображение из тестового набора.

1. Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. Киев: Наукова думка, 2003. 236 с.
2. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics. Englewood. Colorado: Roberts & Company, 2017.
3. Sysyn M., Gerber U., Nabochenko O., Gruen D., Kluge F. Prediction of Rail Contact Fatigue on Crossings Using Image Processing and Machine Learning Methods. *Urban Rail Transit*. 2019. Vol. 5. P. 123–132. <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0105-0>
4. Sambo B., Bevan A., Pislaru C. A Novel Application of Image Processing for the Detection of Rail. *Intern.al Conf. on Railway Engineering (ICRE)* 2016, Brussels, 2016. P. 1–9. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0521>
5. Lauschmann H., Nedbal I. Applications of Image Analysis in Fractography of Fatigue Failures. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 23. P. 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.071>
6. Xuepeng H., Xiaohui C. Research on Surface Fatigue Crack Image Recognition Detection Method Based on Computer Vision Technology. *International Conference on Engineering and Technology Innovations (Wuhan, China, March 26–27, 2016)*. P. 1–6. <https://doi.org/10.2991/iceti-16.2016.1>
7. Le Roux S., Medjedoub F., Dour G., Rezai-Aria F. Image analysis of microscopic crack patterns applied to thermal fatigue heat-checking of high temperature tool steels. *Micron*. 2013. Vol. 44. P. 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2012.08.007>
8. Бялонович А.В., Матохнюк Л.Є. Эволюция структуры сплава АМг6 при периодическом нагружении. *Надійність і довговічність машин і споруд*. 2014. Вип. 39. С. 20–24.
9. Namatēvs I. Deep Convolutional Neural Networks: Structure, Feature Extraction and Training. *Information Technology and Management Science*. 2017. Vol. 20. P. 40–47. <https://doi.org/10.1515/itms-2017-0007>

УДК 621.052:539.43

В.О. Дегтярев, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

*Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України
(Київ, Україна, degtyarev@ipp.kiev.ua)*

ЗАЛИШКОВА ДОВГОВІЧНІСТЬ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПІСЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ПРОКОВКИ

Наявні літературні дані свідчать не тільки про значне продовження ресурсу зварних металоконструкцій після високочастотної механічної проковки (ВМП), але і високу її ефективність для гальмування накопичених втомних пошкоджень. Однак до теперішнього часу залишається не дослідженим вплив різних режимів ВМП на залишкову довговічність і циклічну тріщиностійкість зварних з'єднань.

Мета цієї роботи полягає в оцінці ефективності впливу різних режимів ВМП на залишкову довговічність зварних з'єднань, в тому числі тих, експлуатація яких відбувається зі значним рівнем накопичених втомних пошкоджень у зонах концентраторів напружень.

Як матеріал для досліджень використовувалося стикове зварне з'єднання з листової сталі Ст.3сп. Попередньо зварена встик пластина розрізалася на зразки, які розбивалися на дві партії. Перша складалася з декількох серій зразків, які піддавалися ВМП по лінії сплавлення шва з основним металом за допомогою ультразвукового інструменту при амплітуді коливань робочого органу, що дорівнює 26 мкм, і різної наведеної швидкості його переміщення V (швидкість ВМП), що дорівнює 0,232, 0,116 і 0,06 м/хв відповідно. Після ВМП утворювалася канавка, що залежить від швидкості обробки, шириною 2,6–3,4 мм і глибиною (h), що дорівнює 0,06, 0,105 і 0,18 мм відповідно. У другій партії зварних з'єднань попередньо вирощувалася тріщина втоми однакової довжини ($l_{тр}$) при віднульовому циклі гармонічного навантаження. Потім вони теж розбивалися на кілька серій, кожна з яких зміцнювалась із тими ж параметрами.

Проведені дослідження дозволили визначити для кожної серії зразків кінетичні діаграми залежності зростання тріщини втоми (ЗТВ) від числа циклів навантаження. Аналіз даних показав, що, по-перше, обробка збільшує число циклів до руйнування зразків, по-друге, залишкова довговічність ($N_{ж}$) зразків першої партії більша, ніж другої. Мабуть, відмінність отриманих результатів полягає в тому, на якому етапі досліджень створюються залишкові напруження стиску після ВМП, що призводить до різного характеру їх перерозподілу і, мабуть, до різного розміру зони пластичності і різним за величиною силам, прикладеним до берегів тріщини.

Залежності між залишковою довговічністю зварних з'єднань і швидкістю ВМП при граничній довжині тріщини, що дорівнює 2, 5 і 10 мм показали, що в міру зменшення швидкості проковки, $N_{ж}$ збільшується, залишаючись більшою в зразках, зміцнених в початковому стані. Слід також зазначити, що залишкова

довговічність зразків обох партій помітно збільшується при зниженні V , починаючи з 0,11 м/хв.

Отримані дані також дозволили встановити вплив швидкості проковки на коефіцієнт зміцнення зварних з'єднань при різній поточній довжині тріщини, який збільшується зі зменшенням швидкості ВМП у обох серіях зразків, залишаючись завжди більшим у зразках першої партії. Його зниження зі збільшенням $l_{тр}$ незалежно від V , по-перше, мабуть пов'язано з більш інтенсивною релаксацією залишкових напружень стиску, по-друге, чим більше глибина тріщини перевищує глибину пластично деформованої зони, яка залежить від швидкості ВМП, тим у меншій мірі відбувається його збільшення. Крім цього, зниження швидкості ВМП з 0,232 м/хв до 0,06 м/хв також призводить до зниження відношення коефіцієнтів зміцнення в першій і другій партіях, яке залежить від довжини тріщини в томи. При малих швидкостях ВМП, але великій довжині тріщини в томи, різниця в ефективності зміцнення вже незначна.

Узагальнені залежності між швидкістю ВМП, глибиною канавки і залишковою довговічністю зразків, а також середньою швидкістю росту тріщини в томи, що були отримані для обох партій зварних з'єднань при досягненні $l_{тр}=5$ мм, що вважається небезпечною з точки зору крихкого руйнування високонавантажених елементів металоконструкцій, особливо при їх експлуатації в умовах низьких кліматичних температур, свідчать, що з підвищенням швидкості проковки залишкова довговічність зварних з'єднань зменшується, а швидкість ЗТВ збільшується. Подібна тенденція спостерігається зі зменшенням глибини канавки. Крім того, знаючи залишкову довговічність або швидкість ЗТВ можна встановити взаємозв'язок між V і h при будь-якій довжині тріщини. Узагальнені залежності також можна використовувати при розрахунковому визначенні оптимальної швидкості ВМП ($V_{опт}$), яка при оптимальній глибині канавки ($h_{опт}=0,14$ мм) не залежить від довжини тріщини в зразках першої та другої партій і склала, в середньому, 0,085 м/хв. Запропоновані залежності дозволяють також визначати швидкість ВМП при будь-якій глибині канавки.

Встановлений факт сталості оптимальної швидкості ВМП дозволив визначити залежності між довжиною тріщини і залишковою довговічністю зразків при оптимальній глибині канавки. Аналіз даних показав, що у всьому діапазоні зміни $l_{тр}$ залишкова довговічність першої партії зразків більше. Причому, зі збільшенням довжини тріщини різниця між залишковою довговічністю дещо збільшується. Представлені дані цікаві з практичної точки зору. Обмежуючись різною довжиною тріщини при оптимальних режимах ВМП, знаючи швидкість ЗТВ, можна визначити залишкову довговічність зварного з'єднання, а при відомому періоді до зародження тріщини – нормативний термін експлуатації зварних металоконструкцій.

Результати досліджень, що представлені у вигляді залежності між швидкістю ВМП і відношенням числа циклів до зародження макротріщини довжиною 1 мм до числа циклів при досягненні тріщиною довжини 2, 5 і 10 мм показали, що при зниженні V з 0,232 м/хв до 0,06 м/хв стадія зародження при

довжині тріщини 2 мм знижується з 92 % до 60 %, а при довжині 10 мм вона є менш тривалою і при варіюванні V в таких же межах змінюється з 78 % до 38 %.

Таким чином, отримані експериментальні дані дозволили, по-перше, визначити залишкову довговічність зварного з'єднання або швидкість зростання тріщини втоми як в початковому стані, так і з наявними втомними пошкодженнями в залежності від обраної граничної їх довжини не тільки при різних режимах високочастотної механічної проковки, але і при оптимальній її швидкості, а по-друге, встановити взаємозв'язок між глибиною канавки і швидкістю високочастотної механічної проковки і по одному з них при дослідженій граничній довжині тріщини визначити залишкову довговічність або швидкість ЗТВ, якщо такі дані відсутні. Аналіз отриманих даних дозволив зробити висновок, що зміцнення металоконструкцій переважно необхідно виконувати на стадії їх виготовлення, а при ремонтно-відновлювальних роботах – на ранній стадії розвитку тріщини втоми, незалежно від швидкості високочастотної механічної проковки.

УДК 539.3

М.В. Коляда
О.П. Шугайло
А.В. Панченко
Л.А. Ляшенко

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (Київ, Україна, mv_koliada@sstc.ua)

АНАЛІЗ НДС ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ АЕС В УМОВАХ ЗАПРОЄКТНОЇ АВАРІЇ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ПРОДОВЖЕННЯ ЇЇ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Атомна енергетика посідає одне з провідних місць в економіці України та забезпечує важливий напрям економічної національної безпеки – енергетичний. На АЕС України експлуатуються установки, серед яких переважну більшість становлять реакторні установки (РУ) типу ВВЕР-1000 (В-320, В-302, В-338).

Для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) захисної оболонки (ЗО) РУ АЕС в умовах запроєктної аварії розглянуто та проаналізовано ЗО РУ ВВЕР-1000 В-320 як найбільш поширеної в Україні (11 енергоблоків із 15).

У межах цієї роботи розглянуто особливості моделювання системи попереднього напруження захисної оболонки при параметрах запроєктних аварій (ЗПА). У зв'язку зі складністю конструкції ЗО для її розрахунку було застосовано детальну скінченноелементну модель, що максимально наближено описує реальну роботу конструкції. Розрахунок НДС ЗО виконаний сучасним програмним комплексом ЛІРА, який застосовується для проєктування та розрахунку будівельних конструкцій.

На попередньому етапі проаналізовано результати розрахунку НДС ЗО ВВЕР-1000/В-320 в умовах сполучення навантажень від максимально проєктної аварії (МПА) та максимального розрахункового землетрусу (МРЗ) відповідно до вимог НП 306.2.208-2016 [1] і визначено мінімально допустимі зусилля натягу арматурних канатів. На поточному етапі з урахуванням рекомендацій МАГАТЕ [2] виконано аналіз параметрів ЗПА (тиск та температура), за яких ЗО може втратити свої захисні та локалізуючі функції, проаналізовано результати розрахунків та зроблено відповідні висновки щодо міцності, тримкості ЗО та забезпечення виконання передбачених проєктом її локалізуючих функцій у відповідності до НП 306.2.141-2008 [3].

Результати цього дослідження можуть бути використані Держатомрегулюванням при аналізі обґрунтувань щодо визначення можливих відмов ЗО, викликаних розвитком тяжких аварій, в межах виконання імовірнісного аналізу безпеки другого рівня для енергоблоків АЕС України.

1. Вимоги до сейсмостійкого проєктування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій (НП 306.2.208-2016).

2. SSG-4 Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. 2010.

3. Загальні положення безпеки атомних станцій (НП 306.2.141-2008).

УДК 621.039.534.25: 539.319

О.В. Корольов¹, д-р техн. наук, проф.

В.В. Інюшев², канд. техн. наук

Т.В. Пирогов²

А.С. Колядюк²

¹Одеський національний політехнічний університет

(Одеса, Україна, korolov@onu.ua)

²ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування»

(Київ, Україна, dnic@dnic.com.ua)

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛООБМІННИКА АВАРІЙНОГО РОЗХОЛОДЖУВАННЯ ПРИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ ВВЕР-1000

Одним із ключових завдань ДП «НАЕК «Енергоатом» є продовження терміну експлуатації (ПТЕ) діючих АЕС України. В рамках даного напрямку діяльності АЕС проводиться широкий спектр робіт, однією з яких є оцінка технічного стану (ОТС). Основною метою робіт з ОТС є підтвердження безпечної експлуатації елементів реакторної установки (РУ) в понадпроектний період. У рамках ОТС обладнання, у відповідності до вимог сучасних норм атомної енергетики [1], виконуються роботи з аналізу міцності та надійності.

До основних елементів РУ ВВЕР-1000 входить теплообмінник аварійного розхолодження (ТОАР) 08.8111.335 СБ. Для підтвердження його безпечної експлуатації в понадпроектний період необхідно проводити роботи з ОТС.

У рамках проведення ОТС теплообмінників ТОАР енергоблоку № 4 ВП ЗАЕС, виконувалося розрахункове обґрунтування їх безпечної експлуатації при нормальних умовах експлуатації, аварійних ситуаціях та при роботі під час дії впливів від сейсмічного навантаження. Враховуючи положення діючих документів [2–4], під час розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації теплообмінників ТОАР розглядалися наступні види розрахунків на міцність, що були проведені для всіх елементів теплообмінника:

- розрахунок на статичну міцність;
- розрахунок на циклічну міцність;
- розрахунок на сейсмічні впливи;
- розрахунок на статичну міцність із урахуванням аварійних процесів.

За результатами аналізу експлуатаційної документації було встановлено, що теплообмінники ТОАР беруть участь у наступних аварійних ситуаціях (АС) РУ ВВЕР-1000:

- 1) Малі течії теплоносія першого контуру (еквівалентний діаметр течії до 50 мм):
 - розрив дренажного трубопроводу Ду32;

- 2) Середні течії теплоносія першого контуру (еквівалентний діаметр течії 50 ... 200 мм):
 - Розрив напірного трубопроводу системи аварійного охолодження зони високого тиску (САОЗ ВТ);
 - Розрив трубопроводу системи продувки-підживлення;
 - Ненавмисне відкриття імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску (ІПУ КТ);
- 3) Великі течії теплоносія першого контуру (еквівалентний діаметр течії більше, ніж 200 мм):
 - Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ);
 - Розрив сполучного трубопроводу компенсатора тиску;
 - Розрив сполучного трубопроводу гідроємностей САОЗ;
 - Розрив трубопроводу уприскування КТ;
 - Розрив сполучного трубопроводу ІПУ КТ;
- 4) Розрив паропроводу парогенератора в межах гермооб'єму;
- 5) Розрив трубопроводу живильної води парогенератора в межах гермооб'єму.

Серед аварій із втратою теплоносія першого контуру найгіршими з точки зору зростання температури і тиску в гермооб'ємі є миттєвий двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850 мм. Виходячи з вищенаведеного можна зробити висновок, що найбільші значення температури теплоносія на вході в теплообмінник ТОАР відповідають АС «Режим великої течії: Двосторонній розрив ГЦТ». В подальшому розглядалася саме така АС як найбільш консервативна. Графік зміни значень температури теплоносія на вході в теплообмінник ТОАР від часу, що характерний даній АС, приведено на рис. 1.

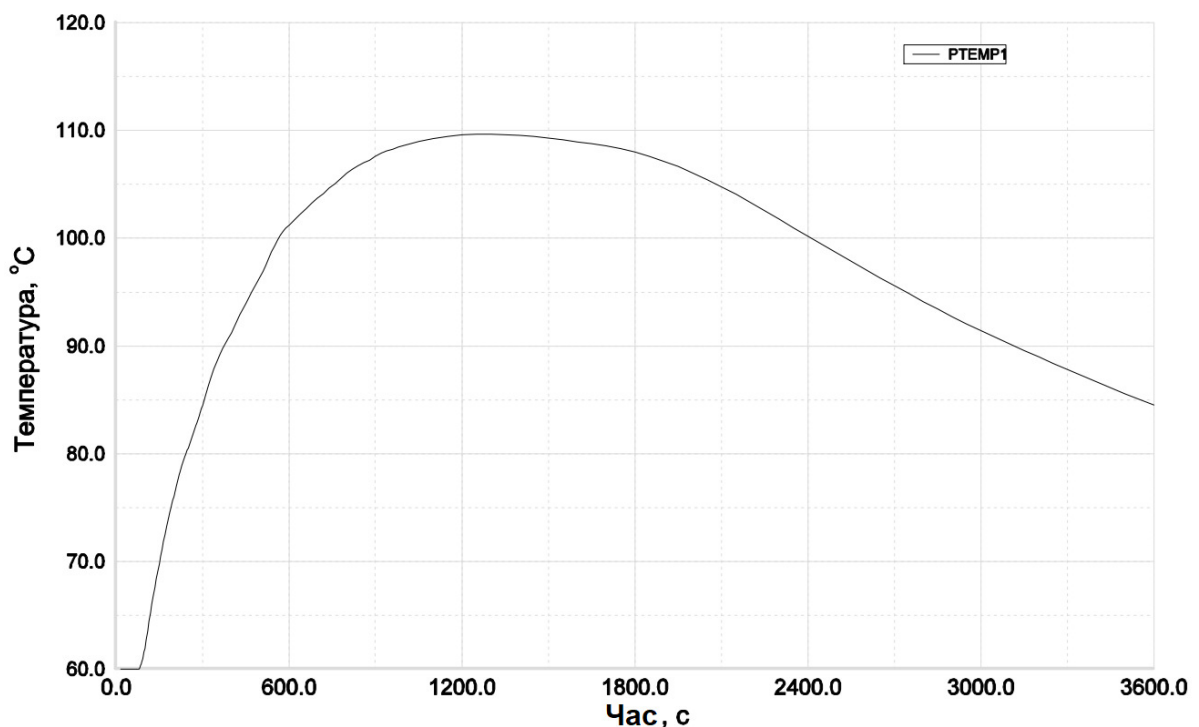


Рис. 1. Температура теплоносія на вході в теплообмінник ТОАР

Додатково розглядалася ситуація, коли температура теплоносія на вході в теплообмінник ТОАР консервативно підіймалася до значення 150 °С. Дане значення температури приймається як проектне у відповідності до положень заводської документації теплообмінника ТОАР та приймається як розрахункове значення температури у проектних розрахунках міцності [5].

Для розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації теплообмінників ТОАР під час АС виконано чисельні розрахунки міцності. Дані розрахунки міцності проводилися з використанням вимог і рекомендацій, що містяться в діючих нормативних документах України з атомної енергетики.

Кінематичні граничні умови задавалися у вигляді заборони всіх переміщень та поворотів конструкції у нерухомій опорі, а також дозволу переміщень у рухомій опорі по поздовжній осі розміщення теплообмінника.

Силкові граничні умови задавалися у вигляді:

- власної ваги теплообмінного апарату;
- маси рідини;
- внутрішнього тиску та температури середовищ;
- навантаження з боку приєднаних трубопроводів (зусилля і моменти);
- зусилля затягу шпильок фланцевих з'єднань.

У результаті виконаних розрахунків міцності за допомогою методу скінченних елементів отримано значення напружень в основних елементах теплообмінника та виконано їх порівняння з допустимими значеннями.

Аналіз отриманих результатів показав, що умови міцності виконуються для всіх основних елементів теплообмінника ТОАР при АС «Режим великої течії: Двосторонній розрив ГЦТ», а також коли температура теплоносія на вході в теплообмінник ТОАР підвищується до значення 150 °С.

1. НП 306.2.099-2004 Загальні вимоги до продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки. Київ: НАЕК «Енергоатом», 2004. 16 с.

2. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

3. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій. Київ: НАЕК «Енергоатом», 2016. 59 с.

4. ПЛ-Д.0.03.126-10. Положение о порядке продления срока эксплуатации оборудования систем, важных для безопасности. Киев: НАЕК «Енергоатом», 2010. 34 с.

5. Пирогов Т.В., Інюшев В.В., Куров В.О., Колядюк А.С. Аналіз проектних розрахунків на міцність теплообмінника аварійного розхолодження на відповідність вимогам діючих нормативних документів в атомній енергетиці. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2020. № 2 (17). С. 30–38. <https://doi.org/10.31717/2311-8253.20.2.4>

УДК 621.721

Ю.М. Латинін, канд. фіз.-мат. наук, доц.
Є.С. Євграфов

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
(Харків, Україна, svarka126@ukr.net)*

СТАН МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ ПІСЛЯ ЇХ ДОВГОТРИВАЛОГО НАПРАЦЮВАННЯ

У процесі довготривалого напрацювання зварних з'єднань паропроводів (понад 270 тис. годин) під дією робочих напруження і температури їх вихідна структура, що регламентується нормативною документацією, перетворюється у ферито-карбідну суміш. Наведене перетворення відбувається з різною швидкістю на ділянках зони термічного впливу зварних з'єднань. Найбільша швидкість характерна для ділянок сплавлення, перегріву і неповної перекристалізації зони термічного впливу. Відповідно структурним перетворенням зменшуються механічні властивості металу зварних з'єднань. При напрацюванні зварних з'єднань паропроводів в умовах повзучості понад 270 тис. годин в їх металі відбуваються незворотні зміни. Такі зміни не дозволяють проводити відновлюючу термічну обробку.

Доцільними є дослідження структури і властивостей металу зварних з'єднань зі сталі 12X1МФ після напрацювання 270 тис. годин, що дозволить визначити їх залишковий ресурс експлуатації. Найбільшою, відносно, пошкоджуваністю характеризуються ті зварні з'єднання, які знаходяться в експлуатації при тиску $20 \div 25$ МПа і температурі $545 \div 565$ °С.

Встановили, що в металі зварних з'єднань зі сталі 15X1М1Ф кількість карбідів M_3O (термін напрацювання 280 тис. годин) зменшилася практично на 30–35 % у порівнянні з вихідною їх кількістю. Відповідно, кількість карбідів $M_{23}C_6$ зросла майже на 38 %. Також збільшилась на 7 і 9 % кількість карбідів VC Mo_2C . Мікротвердість металу зварних з'єднань, у порівнянні з вихідною мікротвердістю, зменшилася приблизно на 15–20 %, а ударна в'язкість – на 12–17 %.

Результати досліджень свідчать, що при напрацюванні зварних з'єднань понад 270 тис. годин в умовах повзучості, їх механічні властивості суттєво зменшуються. Тому для визначення залишкового ресурсу металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС потрібні додаткові дослідження, що дозволить визначити термін подальшої їх експлуатації.

УДК 621.721

В.П. Маршуба, канд. техн. наук, доц.
М.В. Огер

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
(Харків, Україна, marshuba_vp@outlook.com)*

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМУВАННЯ ЗВАРНОГО ШВА

Розвиток машинобудування у галузях ядерної енергетики, хімічної та кріогенної техніки вимагає вдосконалення технології та відповідного обладнання, крім того, розробку засобів для його виробництва. Це, зокрема, відноситься до забезпечування зварювання різних конструкцій із сталей, що не ржавіють, титану та інших кольорових металів, та їх сплавів. Одним із найбільш поширених способів виробництва таких конструкцій в ядерній енергетиці є зварювання у висячому положенні електродом, що не плавиться, в середовищі інертних газів. При цьому виникає можливість утворення таких дефектів, як надмірне провисання металу в корені шва і пропалини. Крім порушення герметичності і погіршення міцності зварного шва виробу, наявність зазначених дефектів знижує корозійну стійкість з'єднань і може призводити до корозійного розтріскування в місці переходу від основного металу до проплавлення. При зварюванні стиків трубопроводів та інших аналогічних конструкцій, крім зменшення прохідного перетину, істотним є і те, що в місці переходу від основного металу до шва, скупчуються опади продуктів, які транспортуються по трубопроводу, та сприяють підсиленню корозії шва. Тому розробка способів, що дозволяють підвищити якість формування шва при зварюванні у висячому положенні, залишається однією з актуальних проблем.

Для отримання стикових швів без пропалин із допустимою висотою провисання металу в корені шва, збільшення товщини зварювальних листів за один прохід і підвищення продуктивності процесу зварювання, використовують різні способи, які утримують рідкий метал зварювальної ванни. Дія сил поверхневого натягу, які утримують рідкий метал на місці при зварюванні у висячому положенні, обмежені через суттєву вагу металу. Тому, для зниження величини провисання металу в корені шва, при зварюванні всі роботи виконують на мінімальних режимах, чим забезпечують невеликий обсяг рідкого металу. При зварюванні деталей товщиною 3...4 мм і більше доводиться робити додаткову обробку крайок.

Зміною складу газу, що контактує з рідким металом, і застосуванням різних шлакоутворюючих компонентів можна лише незначно збільшити сили поверхневого натягу. Більш істотного збільшення сил утримання поверхневим натягом, товщини зварюваного металу за один прохід, можна досягти за рахунок застосування концентрованих джерел тепла [1]. Однак, якість

складання виробу, коливання режиму зварювання, точність напрямку переміщення електрода по стику обмежують застосування цих методів.

Автори роботи [2, 3], виходячи з умови рівноваги сил, що діють одночасно на ванну розплавленого металу з поверхнею проплавлення рівної кривизни, приходять до висновку про те, що при всіх інших рівних умовах, провисання рідкого металу під дією ваги зварювальної ванни і тиску дуги повинно бути значно меншим, ніж при зварюванні дугою постійної дії. Завдяки цьому значно знижується ймовірність утворення пропалин, шви формуються із заданою геометричною формою. Однак для отримання рівномірного профілю шва, зі стабільним проваром, без кратерів і дефектів усадочного характеру, перекриття точок доводиться призначати для більше половини довжини відокремленої зварної точки, що призводить до істотного зниження продуктивності зварювання.

Зварювання на підкладках забезпечує значне збільшення швидкості зварювання і товщини виробів, що зварюються за один прохід. Але використання підкладок обмежується необхідністю доступу до зворотної поверхні шва і неможливістю регулювання висоти провисання шва в процесі зварювання.

Формування шва за рахунок створення перепаду тисків на зовнішній і внутрішній сторонах зварювальної ванни дозволяє отримувати будь-яку висоту провисання шва, в тому числі і під час зварювання виробів, які не мають доступу до зворотної сторони шва. Однак високі вимоги до якості збірки стику, необхідність щільного прилягання камери до поверхні стику, накладають обмеження на застосування цього способу.

Для утримання зварювальної ванни і отримання швів заданої геометричної форми, без різкого переходу від основного металу до шва, збільшення товщини зварювальних деталей за один прохід і підвищення продуктивності зварювання становить значний інтерес використання зовнішніх магнітних полів. Якщо ввести в зварювальну ванну поперечне магнітне поле, що буде пронизувати рідкий метал, взаємодія зварювального струму з магнітним полем створить у ньому об'ємні електродинамічні сили, спрямовані вгору або вниз у залежності від взаємного напрямку магнітного поля і зварювального струму. Однак практичне виконання такого способу ускладнено, так як поперечне магнітне поле, що вводиться в зварювальну ванну, впливає на дугу і при невеликій величині напруженості магнітного поля, є недостатнім для утримання рідкого металу та обриває її. Для попередження цього явища у виріб, що зварюється, вносять два поперечних магнітних поля: одне позаду дуги в область зварювальної ванни, а інше, таке ж, перед дугою, але у протилежному напрямку [4]. Пристрій для накладення таких полів складається з двох електромагнітів, що розташовані над виробом, що зварюється. При зварюванні постійним струмом обмотки електромагнітів живлять постійним струмом, а при зварюванні змінним струмом – змінним струмом промислової частоти. Обмотки електромагнітів можна живити також і зварювальним струмом. Напруженість магнітного поля, а отже, і величина об'ємних електродинамічних сил в зварювальній ванні регулюють зміною струму у

обмотках електромагнітів, а при живленні обмоток електромагнітів зварювальним струмом – зміною числа витків обмоток. Через відсутність безпосереднього контакту пристроїв для магнітного утримання рідкого металу з заготовками, що зварюються, цей метод нечутливий до наявності перевищення крайок, кривизни заготовок та інших факторів, що ускладнює застосування прокладок, камер і та ін. Однак традиційні конструкції пальників для зварювання з магнітним утриманням рідкого металу мають відносно великі габарити, що погіршує огляд зони зварювання, ускладнює маневреність зварювального інструменту і обмежує можливість методу в цілому.

У статті розглянута можливість утримання рідкого металу зварювальної ванни магнітним полем струму, який пропускають по прямолінійному провіднику, що розташований в площині стику, який зварюється, над хвостовою частиною зварювальної ванни, перпендикулярно електроду, що може спростити існуючі способи формування шва при зварюванні у висячому положенні і знизити масогабаритні характеристики пальників для зварювання неплавким електродом з електромагнітним впливом на зварювальну ванну.

1. Лебедев В.К. Устойчивость металлической ванны при сварке тонкого металла. *Автоматическая сварка*. 1975. № 6. С. 71.
2. Ищенко Ю.С., Букаров В.А. Методика оценки статического равновесия жидкой ванны при V-образной разделки кромок. *Сварочное производство*. 1978. № 10. С. 9–13.
3. Кудрявцев М.А., Жандарев А.П., Руктешель Ф.С. К расчёту обратного валика при сварке на весу. *Сварочное производство*. 1982. № 6. С. 10–12.
4. Акулов А.И., Рыбачук А.М. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем. *Сварочное производство*. 1972. № 2. С. 3–4.

УДК 621.002.56

К.Б. Мягкохліб, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
(Харків, Україна, k.miahkokhlib@karazin.ua)

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВІБРОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗАДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ РЕДУКТОРІВ ЕСКАЛАТОРІВ

Своєчасне виявлення дефектів (тріщин, раковин) у деталях машин є задачею важливою й актуальною для багатьох галузей промисловості, оскільки дозволяє уникнути несправностей та виходу з ладу машин і устаткування. Протягом багатьох років Інститут проблем машинобудування Національної академії наук України спільно з комунальним підприємством Харківський метрополітен проводять роботи щодо своєчасного визначення дефектів підшипникових вузлів редукторів ескалаторів. Діагностування дефектів на ранньому етапі, тобто ще при експлуатації дозволяє уникати позапланових простоїв необхідних на ремонтні роботи.

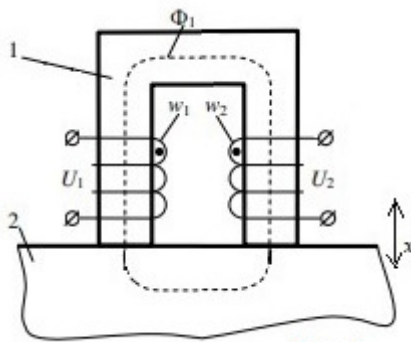


Рис. 1.

Здійснюється контроль амплітуди вібрації в діапазоні частот 2 Гц – 2 кГц або в смугах частот, які відповідають власним частотам коливань елементів конструкції редукторів, що резонують при проходженні хвиль, викликаних ударами дефектних елементів підшипників. Пропонується здійснення контролю за допомогою електромагнітних віброперетворювачів [1, 2] зображених на рис. 1.

Де 1 – віброперетворювач; 2 – корпус редуктора; Φ_1 – магнітний потік; $w_{1,2}$ – електричні обмотки; x – переміщення; $U_{1,2}$ – напруга.

Використання запропонованих електромагнітних віброперетворювачів спільно з системою керування [3] дасть можливість проводити діагностування дефектів підшипникових вузлів редукторів ескалаторів у так званому «on line» режимі, що в свою чергу надасть змогу отримати економічний ефект від підвищення надійності роботи редукторів ескалаторів та запобігання незапланованим простоям внаслідок позачергових ремонтних робіт.

1. Божко О.Є., Белих В.І., Іванов Є.М., Мягкохліб К.Б. Теорія електромагнітних вібробуджувачів. Харків: ХНАДУ, 2008. 435 с.

2. Мягкохліб К.Б., Полищук О.Ф. Анализ электромагнитного вихретокового датчика дефектоскопа с Ш-образным сердечником. *Проблемы машиностроения*. 2017. Т. 20. № 4. С. 53–57. <https://doi.org/10.15407/pmach2017.04.053>

3. Божко А.Е., Белых В.И., Мягкохліб К.Б. Метод и система определения параметров плоскостной вибрации машин. *Проблемы машиностроения*. 2007. Т. 10. № 2. С. 45–48.

УДК 537.63

Є.П. Почапський, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

Б.П. Клим, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Н.П. Мельник, канд. техн. наук, наук. співроб.

Я.Д. Толопко

П.П. Великий

П.М. Долішній

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
(Львів, Україна, pochapskyi@ipm.lviv.ua)*

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ФЕРОМАГНЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

Проблема технічного діагностування стану тривалоексплуатованих виробів і металевих конструкцій, зокрема, обладнання теплоелектростанцій, трубопровідного транспорту, машинобудування, що вичерпали свій проектний ресурс і потребують заміни, стає дедалі актуальнішою для усунення ризиків раптового руйнування та забезпечення їх безаварійної роботи.

Наявність різного роду експлуатаційних навантажень, різка зміна температури, опади, вологість та інші фізичні чинники, призводять до деградації конструкційних матеріалів, появи залишкових напружень, що зменшує їх несучу здатність, зумовлює зародження та розвиток мікротріщин, а надалі й руйнування елементів конструкцій.

Для проведення діагностування елементів конструкцій та виробів, виготовлених з феромагнетних матеріалів, перспективним є метод магнетопружної акустичної емісії (МАЕ), що поєднує два фізичні принципи: перемагнення зовнішнім магнетним полем і реєстрацію пружних хвиль, які виникають під час стрибкоподібного переміщення 90°-них доменних стінок у феромагнетиках [1–2].

У попередніх дослідженнях встановлено високу чутливість параметрів сигналу МАЕ до структурних змін матеріалу феромагнетного об'єкта, залежність від режиму термообробки, пластичної деформації, залишкових напружень, наводнення тощо [1–3]. Це зумовило потребу розвитку та впровадження методу МАЕ як потенційно ефективного засобу неруйнівного контролю (НК) об'єктів і елементів конструкцій, виготовлених із феромагнетних матеріалів.

Для апаратного забезпечення діагностування методом МАЕ в Фізико-механічному інституті НАН України розроблено магнетоакустичну систему «МАЕ-1ЛР» (рис. 1) [4]. Вона складається з трьох блоків. Перший основний блок – блок відбору і опрацювання (БВО). В ньому реалізовано канал реєстрації сигналу МАЕ, канали вимірювання індукції перемагнечувального поля, напруженості магнетного поля розсіювання та струму перемагнення. Також

реалізовано канал зв'язку з персональним комп'ютером. В БВО формується сигнал перемагнення, заданої частоти та форми, який поступає на блок перемагнення системи (БПМ).



Рис. 1. Дослідний зразок магнетоакустичної системи «МАЕ-1/Р»

У БПМ знаходиться блок живлення, який забезпечує стабілізованими напругами БВО та напруги для реалізованого в БПМ підсилювача потужності перемагнечувального сигналу, який поступає на накладний електромагнет (НЕМ) П-подібної форми, яка забезпечує глибше проникнення магнетного поля у феромагнетик, а також кращу його локалізацію в заданому об'ємі і, відповідно, – краще перемагнення заданого об'єму феромагнетика з метою збудження сигналу МАЕ – носія інформації про його фізичний стан. Для автономного живлення системи служить блок акумуляторів (АК).

Розроблене інформаційне програмне забезпечення системи дає можливість досліджувати амплітудні, часові та частотні параметри сигналу МАЕ. Зокрема, реалізовані алгоритми побудови гістограм амплітудного та часового розподілів, знаходження огинаючої сигналу МАЕ, оцінки залежності кількості імпульсів сигналу МАЕ від порогу дискримінації, алгоритм знаходження частотного спектра сигналу та інші [5–8].

Використовуючи розроблену систему експериментально досліджено вплив фізико-хімічних та механічних властивостей феромагнетних матеріалів на інформаційні параметри сигналу МАЕ, на основі чого запропоновано та розроблено методику оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій.

Для розробки методики оцінювання напруженого стану феромагнетних матеріалів методом МАЕ до пластинчастих зразків однакового розміру прикладали зусилля одновісного розтягу, перемагнечували їх зовнішнім полем та реєстрували сигнали МАЕ [1]. Перемагнення здійснювали сигналом синусоїдальної форми, використовуючи накладний П-подібний НЕМ.

За отриманими результатами побудовано залежності суми амплітуд сигналів МАЕ, їх тривалості від величини прикладених напружень (рис. 2). Зі збільшенням навантаження спостерігаємо значне зменшення амплітуди сигналів МАЕ та їх тривалості.

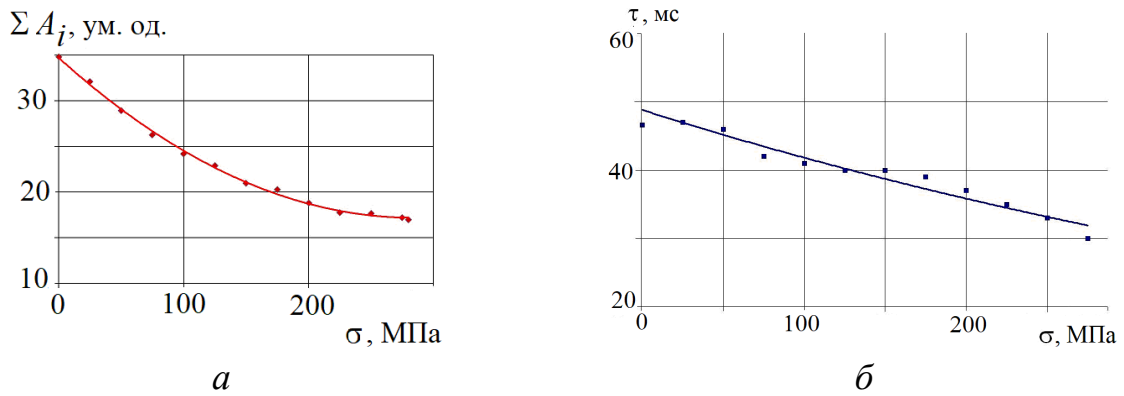


Рис. 2. Залежності суми амплітуд (а) та тривалості (б) сигналів МАЕ від величини напружень для зразка зі сталі 19Г

Знайдено оцінки розподілів амплітуд імпульсів МАЕ для різних значень прикладеного навантаження (рис. 3, а). Ґрунтуючись на результатах досліджень про експоненційний закон розподілу амплітуд сигналу МАЕ [8], побудовано залежність коефіцієнтів загасання апроксимувальних експонент оцінок амплітудних розподілів від прикладеного навантаження (рис. 3, б). Очевидно, що одержані залежності можна використовувати як градувальні криві для діагностування залишкових напружень у феромагнетних об'єктах тривалої експлуатації.

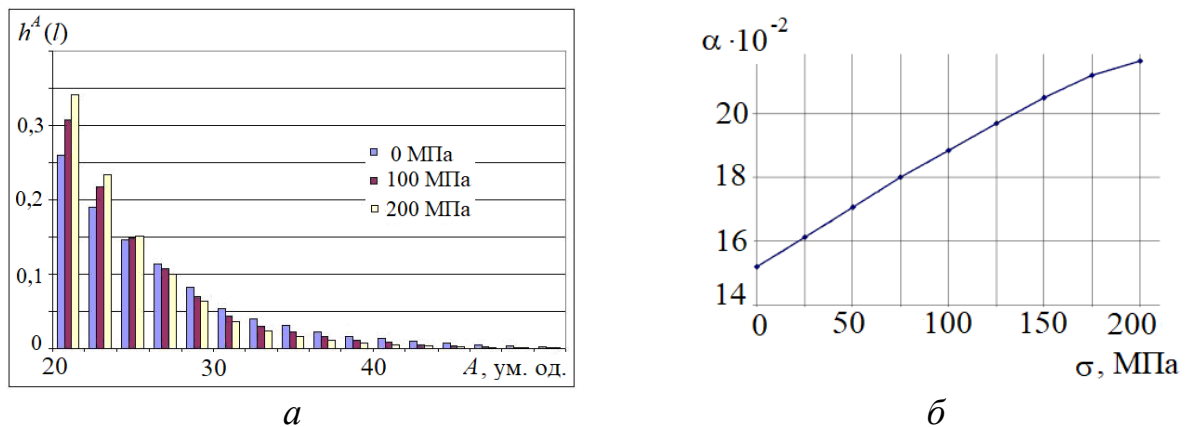


Рис. 3. Оцінки розподілу амплітуд (гістограми) (а) та залежність коефіцієнта загасання апроксимувальної експоненти (б) розподілу за різних навантажень для зразка зі сталі 19Г

Залежності на рис. 2, б та рис. 3, б характеризуються стійкістю до низки експериментальних чинників, які впливають на амплітудні характеристики сигналу (коефіцієнта підсилення сигналу МАЕ, якості контакту перетворювача акустичної емісії з поверхнею об'єкта, діаграми напрямленості перетворювача), в порівнянні з аналогічною залежністю суми амплітуд сигналу від величини прикладеного навантаження (рис. 2, а).

На основі проведених комплексних досліджень, запропоновано методику діагностування напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій за параметрами сигналу МАЕ, яка передбачає: реєстрування МАЕ на ділянці досліджуваного об'єкта; опрацювання зареєстрованого сигналу згідно розроблених алгоритмів та оцінювання тривалості огинаючої сигналів МАЕ та

коефіцієнта загасання апроксимувальної експоненти; знаходження за еталонними залежностями тривалості огинаючої чи коефіцієнта загасання від прикладеного напруження відповідних значень залишкового напруження в діагностованій області феромагнетного матеріалу. Запропонована методика дає змогу виявляти зони залишкового напруження під час діагностування феромагнетних об'єктів.

Здійснено діагностування методом МАЕ тривалоексплуатованих трубних сталей, зокрема, матеріалу труби магістрального нафтогону (сталь 19Г) (Івано-Франківська обл.), яку експлуатували протягом 1971–2009 рр., а також матеріал труби магістрального газогону (сталь 17Г1С) (Тернопільська обл.), яку експлуатували протягом 1973–2012 рр [6]. Розміри труби нафтогону: зовнішній діаметр – 720 мм, товщина стінки труби – 10 мм. Розміри труби газогону: зовнішній діаметр – 1000 мм, товщина стінки труби – 10 мм.

Узагальнення наведених результатів дозволяє зробити висновок, що метод МАЕ є достатньо чутливим для дослідження напруженого стану феромагнетних матеріалів, зварних елементів конструкцій після тривалого періоду експлуатування у різних середовищах. Це свідчить про можливість застосування даного методу для проведення НК таких матеріалів.

1. Skal's'kyi V.R., Pochaps'kyi E.P., Klym B.P., Rudak M.O. Application of the Method of Magnetoelastic Acoustic Emission for the Analysis of the Technical State of 19G Steel After Long-Term Operation in an Oil Pipeline. *Materials Science*. 2016. Vol. 52. P. 385–389. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9968-3>

2. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Рудак М.О. Застосування методу магнетопружної акустичної емісії для контролю напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій. *Технологические системы*. 2016. № 2. С. 67–69.

3. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Коблан І.М. Підвищення ефективності збудження сигналів магнетопружної акустичної емісії. *Відбір і обробка інформації*. 2016. № 44 (120). С. 5–11.

4. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Толопко Я.Д., Мельник Н.П., Рудак М.О., Коблан І.М. Розроблення концепції побудови системи діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами магнетопружної акустичної емісії. Матеріали доповідей 8-мої Національної науково-технічної конференції з неруйнівного контролю та технічної діагностики. (Київ, 22–24 листопада 2016). 2016. С. 249–254.

5. Pochaps'kyi E.P., Mel'nyk N.P., Koblan I.M. Influence of the Conditions of Excitation and Generation of Magnetoelastic Acoustic Emission Signals in Ferromagnetic Materials. *Materials Science*. 2018. Vol. 54. P. 444–449. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0204-1>

6. Почапський Є.П., Клим Б.П., Мельник Н.П., Великий П.П., Долішній П.М. Оцінювання впливу механічних властивостей конструкційних феромагнетних матеріалів та їх зварних з'єднань на зміну параметрів магнетопружної акустичної емісії. *Технічна діагностика и неруйнівний контроль*. 2019. № 2. С. 7–12.

7. Pochapskyu Y.P., Melnyk N.P. Mathematical model and informative features of the signal of the magnetoelastic acoustic emission. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2019. No. 4. P. 105–110.

8. Pochapskyu Y.P., Klym B.P., Melnyk N.P., Velykyi P.P. Statistical properties of signal pulse amplitude of magnetoelastic acoustic emission. *Information Extraction and Processing*. 2019. Vol. 47(123). P. 47–53. <https://doi.org/10.15407/vidbir2019.47.047>

УДК 539.3

О.М. Сєрікова¹, канд. техн. наук
О.О. Стрельнікова², д-р техн. наук, проф.
Д.В. Крютченко²

¹Національний університет цивільного захисту України
(Харків, Україна, elena.kharkov13@gmail.com)

²Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України
(Харків, Україна, elena15@gmx.com, wollydenis@gmail.com)

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАННЯ РІДИНИ В РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ РІДИН

Контейнери та резервуари для зберігання екологічно небезпечних рідин (ЕНР) широко використовуються в різних областях інженерної практики, таких як авіабудування, хімічна і нафтогазова промисловість, енергетичне машинобудування, транспорт. Ці резервуари функціонують в умовах підвищених технологічних навантажень і заповнені нафтою, легкозаймистими або отруйними речовинами. В результаті раптової дії сейсмічних навантажень, рідина, що зберігається в резервуарах починає відчувати інтенсивні плескання.

Плескання – це феномен, який спостерігається в ряді промислових об'єктів: в контейнерах для зберігання зрідженого газу, нафти, паливних баках, в резервуарах вантажних танків. Відомо, що саме частково заповнені резервуари піддаються дії особливо інтенсивних плескань. Це може привести до високого тиску на стінки резервуара, руйнування конструкції або до втрати стійкості і може викликати вплив екологічно небезпечного вмісту в навколишнє середовище та привести до серйозних наслідків. Потрапляння ЕНР з резервуарів для їх зберігання в навколишнє середовище та їх подальше розповсюдження на територію населених пунктів може бути причиною масових отруєнь людей, тварин, привести до забруднення об'єктів довкілля. Розлив рідини здатний привести до вибухів і пожежі, які можуть перекинутися на сусідні резервуари і прилеглу місцевість. Економічні збитки від аварій з руйнуванням резервуарів, витоком та пожежею нафтопродуктів включають не тільки прямі втрати, а й витрати на заходи щодо відновлення навколишнього середовища [1, 2].

Аналіз досліджень, присвячених проблемам плескання рідини в резервуарах, надано в роботах Р.А. Ібрагіма [3, 4]. Відзначимо також роботи, присвячені плесканню рідини в циліндричних резервуарах під дією сейсмічних навантажень [5, 6].

У даній роботі розглядається задача про коливання рідини в довільній оболонці обертання. Позначимо змочену поверхню оболонки через S_1 , а вільну поверхню – S_0 (Рис. 1.) Як модель нафтосховища розглянемо циліндричну оболонку з плоским дном, частково заповнену рідиною.

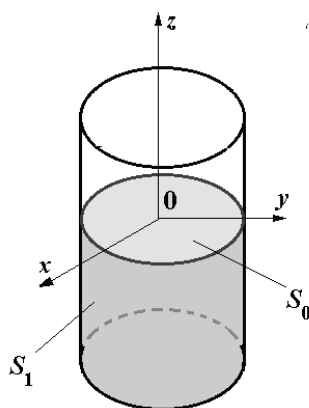


Рис. 1. Циліндричний резервуар

Вважаємо, що декартова система координат $Oxyz$ пов'язана з оболонкою, вільна поверхня рідини S_0 збігається з площиною xOy в стані спокою. Передбачається, що рідина ідеальна, нестислива, а її рух, що почався зі стану спокою, є безвихровим. У цих умовах існує потенціал швидкостей рідини, що задовольняє рівнянню Лапласа:

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; V_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z},$$

Величину тиску p на стінки оболонки визначаємо з лінеаризованого інтеграла Коші-Лагранжа за формулою:

$$p = -\rho_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) + p_0 + a_s(t)x,$$

в якій Φ – потенціал швидкостей, g – прискорення вільного падіння, z – координата точки рідини, яка відлічується у вертикальному напрямку, ρ_l – щільність рідини, p_0 – атмосферний тиск, $a_s(t)x$ – функція, що характеризує зовнішній вплив (горизонтальний сейсм або імпульс).

На вільній поверхні рідини повинні бути виконані наступні кінематична і динамічна умови:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0,$$

де функція ζ описує форму і положення вільної поверхні.

Таким чином, для потенціалу швидкостей маємо наступну крайову задачу

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Phi &= 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_1} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0; \\ \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta + a_s(t)x \right|_{S_0} &= 0. \end{aligned}$$

Визначивши потенціал швидкостей Φ і функцію ζ , встановимо висоту підйому вільної поверхні і визначимо тиск рідини на стінки оболонки.

Представимо потенціал Φ у вигляді

$$\Phi = \sum_{k=1}^M \dot{d}_k \varphi_k. \quad (1)$$

Для функцій φ_k розглянемо такі крайові задачі:

$$\nabla^2 \varphi_k = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} \right|_{S_1} = 0, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad \frac{\partial \varphi_k}{\partial t} + g\zeta = 0. \quad (3)$$

Продиференціюємо друге співвідношення в (3) по t і підставимо в отриману рівність $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ з першого співвідношення. Далі представимо функції φ_k у вигляді $\varphi_k(t, x, y, z) = e^{i\chi_k t} \varphi_k(x, y, z)$. Приходимо до проблеми власних значень, при цьому на вільній поверхні буде виконано рівність

$$\frac{\partial \varphi_k}{\partial n} = \frac{\chi_k^2}{g} \varphi_k. \quad (4)$$

Для рівняння вільної поверхні отримаємо вираз

$$\zeta = \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial n}. \quad (5)$$

У циліндричній системі координат маємо вирази для шуканих функцій

$$\varphi_k(r, z, \theta) = \varphi_k(r, z) \cos \alpha \theta. \quad (6)$$

Тут α – номер гармоніки. Таким чином, окремо розглядаються частоти і форми вільних коливань для різних α .

Представимо φ у вигляді суми потенціалів простого і подвійного шару [6]

$$2\pi\varphi(P_0) = \iint_S \frac{\partial \varphi}{\partial n} \frac{1}{|P - P_0|} dS - \iint_S \varphi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{|P - P_0|} dS. \quad (7)$$

Тут $S = S_1 \cup S_0$; точки P та P_0 належать поверхні S .

Величина $|P - P_0|$ – декартова відстань між точками P та P_0 .

Задовольнивши граничні умови (2), (3), приходимо до системи інтегральних рівнянь у вигляді [6–8]

$$\begin{cases} 2\pi\varphi_1 + \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - \frac{\kappa^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 + \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) dS_0 = 0, \\ - \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - 2\pi\varphi_0 + \frac{\kappa^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Тут для зручності позначаємо значення потенціалу на вільній поверхні як φ_0 та φ_1 на стінках оболонки.

Рішення системи (8) шукаємо у вигляді (6).

Для розв'язання цієї системи сингулярних інтегральних рівнянь застосуємо метод граничних елементів [6, 7].

Визначивши базисні функції φ_k , підставимо їх у вирази для потенціалу швидкостей (1) і форми вільної поверхні (5). Отримані ряди підставляємо в крайову умову на вільній поверхні

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta + a_s(t)x \right|_{s_0} = 0.$$

Оскільки в циліндричній системі координат $x = r \cos \theta$, то нас буде цікавити тільки перша гармоніка, тобто у формулі (6) вважаємо $\alpha=1$. Приходимо до наступного співвідношення, виконаного на поверхні S_0

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \varphi_k + g \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} + a_s(t)r = 0.$$

Але на поверхні S_0 виконано співвідношення (4), тоді наведена вище рівність набуде вигляду

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \varphi_k + \sum_{k=1}^M \chi_k^2 d_k \varphi_k + a_s(t)r = 0. \quad (9)$$

Помноживши рівність (9) скалярно на φ_l ($l = \overline{1, M}$) і скориставшись ортогональністю власних форм, отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь другого порядку

$$\ddot{d}_k + \chi_k^2 d_k + a_s(t)F_k = 0; \quad F_k = \frac{(r, \varphi_k)}{(\varphi_k, \varphi_k)}; \quad k = \overline{1, M}. \quad (10)$$

Вважаємо, що до додатка горизонтального імпульсу резервуар знаходився в стані спокою. Тоді (10) вирішуємо при нульових початкових умовах. Для вирішення системи (10) в роботі застосовано операційний метод [7].

Результати досліджень дозволять зробити підбір параметрів резервуарів для збереження ЕНР від впливу резонансних частот, попередити їх руйнування та продовжити строк експлуатації, що дозволить підвищити рівень екологічної безпеки прилеглих до резервуарів територій.

1. Бурау Н.І., Лук'янченко О.О., Костіна О.В., Цибульник С.О. Структурний моніторинг вертикальних сталевих резервуарів [монографія]. Київ: Центр учбової літератури, 2019. 160 с.

2. Серікова О.М., Стрельникова О.О. Вплив резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин на навколишнє середовище. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). 2020. С. 238–239.

3. Ibrahim R.A., Pilipchuck N., Ikeda T. Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. 2001. Vol. 54. No. 2. P. 133–199. <https://doi.org/10.1115/1.3097293>

4. Ibrahim R.A. Liquid Sloshing Dynamics. Cambridge University Press, New York, 2005.

5. Ventsel E., Naumenko V., Strelnikova E., Yeseleva E. Free vibrations of shells of revolution filled with a fluid. *Engineering analysis with boundary elements*. 2010. Vol. 34. P. 856–862. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2010.05.004>

6. Шувалова Ю.С., Крютченко Д.В., Стрельникова Е.А. Интегральные уравнения в задаче о свободных и вынужденных колебаниях жидкости в жестких резервуарах. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2016. № 3(58). С. 455–459.

7. Еселева Е.В., Гнитко В.И., Стрельникова Е.А. Собственные колебания сосудов высокого давления при взаимодействии с жидкостью. *Проблемы машиностроения*. 2006. Т. 9. № 1. С. 105–118.

8. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumemko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles. *J. Modern Technology & Engineering*. 2018. Vol. 3. No. 1. P. 15–52.

УДК 621.791.

Б.В. Сітніков, канд. техн. наук

П.В. Лутай

Р.М. Хомко

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
(Харків, Україна, sitnikovboris@outlook.com)*

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

У даний час все більше звертається увага на необхідність розробки і впровадження у виробництво високоефективних технологій, що дозволяють підвищити конкурентоспроможність продукції, що випускається в країні. Одним із напрямків успішного вирішення цього завдання в області зварювального виробництва є вдосконалення технологічних процесів зварювання з метою попередження утворення характерних дефектів швів, покращення експлуатаційних характеристик зварних з'єднань в цілому, і підвищення продуктивності зварювальних робіт.

Алюмінієві сплави – основні матеріали у багатьох силових і відповідальних конструкціях, які працюють у найрізноманітніших умовах: при підвищених температурах і в кріогенній техніці, при постійних і змінних навантаженнях, в помірному кліматі, в тропіках і на півночі. Різноманітні умови експлуатації конструкцій викликали необхідність створення сплавів із різними властивостями. Закономірно постійне прагнення створити сплави все більш міцні, з підвищеною ваговою віддачею, при цьому висока міцність повинна поєднуватися з достатньою в'язкістю руйнування, високим опором змінним навантаженням, технологічністю та ін.

У роботі розглянута можливість підвищення якості зварних з'єднань алюмінієвих сплавів АМг6 і АД0 при автоматичному зварюванні електродом, що плавиться в інертних газах, і сплаву 01430 при точковому контактному зварюванні шляхом вдосконалення технології і обладнання для зварювання. Показано, що попередній підігрів алюмінієвих сплавів АМг6 і АД0 при автоматичному зварюванні електродом, що плавиться, призводить до зниження пористості та підвищення механічних властивостей зварних з'єднань. Надані рекомендації щодо точкового контактного зварювання по шару клею тонколистових конструкцій сплаву 01430. Наведено механічні властивості клейозварних з'єднань.

УДК 539.3/4:620.179.17

О.М. Станкевич, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

В.Р. Скальський, чл.-кор. НАН України

Я.Д. Толопко

П.М. Долішній

Фізико-механічний інститут ім. В.Г. Карпенка НАН України

(Львів, Україна, pminasu@ipm.lviv.ua)

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ РУЙНУВАННЯ ФІБРОБЕТОНІВ

Розширення застосування фібробетону в багатьох галузях будівництва вимагає не лише постійного вдосконалення його механічних властивостей, але й розроблення методик діагностування стану конструкцій на його основі. На особливу увагу заслуговують композитні матеріали, в яких функцію матриці виконує цементний камінь, отриманий на основі портландцементу, а для армування використовують базальтову та поліпропіленову фібру [1]. Значний потенціал для ідентифікування стадій та оцінювання пошкодженості армованих фіброю бетонів виявив метод акустичної емісії (АЕ) [2]. Для цього всесторонньо вивчали амплітудно-часові параметри сигналів АЕ, надаючи менше уваги частотним. Відомо, що кожен механізм руйнування в матеріалі генерує пружні хвилі певного частотного діапазону. Розвиваючи дослідження у цьому напрямку, для аналізу сигналів АЕ ефективно використовувати метод вейвлет-перетворення (ВП), який дає змогу за локальним аналізом у спектрі розрізняти механізми руйнування композитів [3].

Мета досліджень – ідентифікувати механізми руйнування фібробетону за параметрами ВП сигналів АЕ.

Для випробувань виготовляли призматичні зразки (40×40×160 мм) із цементного розчину, який готували змішуванням портландцементу ПЦ II/A-3-500, гіперпластифікатора на основі полікарбонату Verament ТВ-1, базальтової та поліпропіленової фібр. Досліджували три їх типи: I – цементний камінь без армування (контрольний); II, III – армований базальтовим та поліпропіленовим волокнами, відповідно. Щоб забезпечити повторюваність експериментальних результатів, виготовили по п'ять зразків кожного типу композиту, які випробували триточковим згином на установці УМЭ-10ТМ (швидкість навантаження 4×10^{-7} м/с) із паралельним відбором АЕ-інформації за допомогою системи SKOP-8М [4]. У режимі постоопрацювання будували діаграми «навантаження P –прогин ν » та визначали розподіл АЕ-активності. Локальні особливості сигналів АЕ оцінювали за параметрами їх неперервного ВП (НВП) згідно з розробленою раніше методикою та встановлювали тип руйнування в матеріалі [5]. На основі енергетичного критерію ідентифікування типів руйнування за параметром E_{WT} локальних імпульсів сигналів АЕ розрізняють: в'язке руйнування (пластична деформація), якщо $E_{WT} < 0,01$;

в'язко-крихке (мікротріщиноутворення), якщо $0,01 \leq E_{WT} < 0,1$; і крихке (зародження і ріст макротріщини), за умови $E_{WT} \geq 0,1$.

Акустичні властивості неармованого цементного каменю. Спочатку досліджували акустичні властивості неармованого цементного каменю (зразок типу I). Характер кривої навантаження підтверджує, що цементний камінь належить до крихких матеріалів. Граничне навантаження за згину було у межах 2,17...2,54 кН. На початку експерименту спостерігали незначну АЕ-активність, яка суттєво зростала за досягнення $P = 1,78 \pm 0,32$ кН і до повного руйнування зразка. На початкових стадіях руйнування генерувались сигнали АЕ із максимальною амплітудою в межах 150...200 ум. од. та максимальною частотою 250...270 кГц.

За подальшого зростання навантаження двічі спостерігали підвищення АЕ-активності, зростання амплітуд сигналів АЕ до 400 ум. од., що свідчить про активний розвиток руйнування. Хоча переважають сигнали АЕ з частотним діапазоном 250...270 кГц, випромінюється також незначна кількість сигналів із максимальною частотою в діапазоні 290...310 кГц, що свідчить про появу на цьому етапі навантаження нових механізмів руйнування. На підставі частотного аналізу можна стверджувати, що перший стрибок АЕ-активності відповідає зародженню макротріщини, а наступний – її стрімкому поширенню.

Оскільки основними дефектами цементного каменю (зв'язної фази композиту) є пори різних розмірів та мікротріщини, то генерування сигналів АЕ уже на початку експерименту пов'язане з розвитком цих дефектів. Зі зростанням навантаження пори та мікротріщини зливаються, утворюючи макротріщину, яка поширюючись, призводить до поділу зразка на дві частини. Ці процеси проявляються у зміні параметрів сигналів АЕ, які їх супроводжують.

Застосувавши алгоритм ідентифікування типів руйнування [5], визначили основні параметри сигналів АЕ, які супроводжували руйнування зразка цементного каменю (табл. 1).

Таблиця 1. Параметри сигналів АЕ, які супроводжували ймовірні механізми руйнування зразка цементного каменю

Механізм руйнування	$WT_{\max}$	$f_{\max}$, kHz	Δt , μs	E_{WT}
Мікророзтріскування	0,065...0,09	250...310	10...13	0,03...0,089
Поширення макротріщини	0,126...0,16	250...270	15...18	0,15...0,213

Під час руйнування цементного каменю чергуються сигнали АЕ з різними амплітудами, тривалістю та максимальними частотами, що свідчить про утворення нових дефектів різного розміру. За результатами ідентифікування типів руйнування цементний камінь руйнується внаслідок поширення мікро- ($E_{WT} = 0,03...0,89$) та макротріщин ($E_{WT} = 0,1...0,213$), що узгоджується з особливостями його мікроструктури.

Цементний камінь, армований базальтовою фіброю. Виявили, що характер кривої руйнування композиту з 1% базальтової фібри (тип II) суттєво не змінюється порівняно з неармованим цементним каменем. Граничне

навантаження за згину було у межах 3,6...4,0 кН, середнє значення якого перевищує аналогічний показник для неармованого цементного каменю приблизно в 1,6 рази. На початкових стадіях руйнування зафіксували незначну АЕ-активність, що свідчить про гальмівну дію армувальної фібри [1]. За досягнення $P = 2,45 \pm 0,6$ кН АЕ-активність поступово збільшується, що проявлялось у значному зростанні кількості подій АЕ та чергуванні сигналів АЕ з меншими та більшими амплітудами аж до поширення макротріщини на весь переріз зразка.

На початкових стадіях руйнування базальтового фібробетону реєстрували сигнали, амплітуда яких не перевищувала 175 ум. од. Водночас їх частотні параметри відрізнялись. Хоча домінувала частота 250 кГц, генерувались також сигнали вищих частот > 300 кГц. Енергетичний параметр для переважної кількості сигналів був у межах 0,019...0,106, а для сигналів із вищими частотами становив 0,005...0,0086.

У період активного розвитку руйнування в композиті значно змінюються амплітудні та частотні параметри сигналів АЕ. Зокрема, діапазон амплітуд суттєво розширюється – від 75 до 530 ум. од., виділяються три частотні діапазони: 250...310, 350...400 та 425...470 кГц, хоча домінує перший із них. Такі зміни свідчать про різні механізми руйнування композиту під навантаженням. Зауважимо, що всі зразки після долому мали гладкий злам без витягнутих із матриці волокон, що підтверджує високу адгезію базальтового волокна з матрицею, зростання міцності та структурну цілісність композиту.

Ураховуючи результати ідентифікування типів руйнування неармованого цементного каменю, встановили відповідність сигналів АЕ механізмам руйнування базальтового фібробетону (табл. 2).

Таблиця 2. Параметри сигналів АЕ, які супроводжували ймовірні механізми руйнування зразків базальтового та поліпропіленового фібробетону

Механізм руйнування	$f_{\max}$, кГц	Δt , мкс	E_{WT}
Базальтовий фібробетон			
Мікро- / макророзтріскування	250...310	15...25	0,019...0,5
Пластична деформація	350...400	5...9	0,005...0,0086
Руйнування волокна	425...470	8...10	0,015...0,11
Поліпропіленовий фібробетон			
Мікро- / макророзтріскування	200...300	10...22	0,015...0,357
Пластична деформація	370...400	4...8	0,0036...0,007
Руйнування волокна	420...470	7...9	0,092...0,1

Порівнюючи отримані дані з результатами дослідження неармованого цементного каменю, можна зауважити, що навіть незначна кількість фібри призводить до зміни як механічних, так і акустичних властивостей матеріалу.

Цементний камінь, армований поліпропіленою фіброю. Після додавання 1% поліпропіленої фібри до цементної матриці (тип ІІІ) характер кривої руйнування суттєво не змінюється. Водночас граничне навантаження за згину зразків типу ІІІ було у межах 2,8...3,2 кН, середнє значення якого приблизно в 1,3 рази більше, ніж для неармованого цементного каменю, але в 0,8 раз

менше, ніж для базальтового фібробетону. Отже, армування цементного каменю базальтовою фіброю забезпечує більшу міцність фібробетону, ніж поліпропіленовою. Це узгоджується з результатами виконаних раніше теоретичних розрахунків прогнозованої міцності композиту, армованого різною фіброю.

За енергетичним критерієм ідентифікування типів руйнування встановили відповідність сигналів АЕ з механізмами руйнування поліпропіленового фібробетону (табл. 2).

Висновки. Досліджено механічні та акустичні властивості неармованого та армованого різною фіброю цементного каменю. Фіброволокно у цементній матриці підвищує міцність матеріалу: базальтове – в 1,6 рази, поліпропіленове – в 1,2 рази. Водночас базальтовий фібробетон міцніший, ніж поліпропіленовий, що пов'язано з різними механічними та фізичними властивостями фібри.

На акустичні характеристики фібробетону впливають дефектність матриці та властивості різних типів фібри. Високоміцна базальтова фібра, яка має добру адгезію з цементною матрицею, краще стримує розвиток дефектів за малого навантаження, однак, за досягнення його високих значень руйнування розвивається стрімко. Поліпропіленова через здатність витримувати більшу деформацію забезпечує рівномірний розвиток руйнування, який пришвидшується уже з наближенням до граничного навантаження. Кумулятивна сума амплітуд сигналів АЕ під час руйнування базальтового фібробетону на порядок вище, ніж поліпропіленового. Відмінності властивостей цих фібр проявляються і в енергії сигналів АЕ. Більшу енергію мали сигнали АЕ, які генерувались під час руйнування базальтового фібробетону.

Запропонована методика аналізу сигналів АЕ за їхніми спектральними та енергетичними параметрами дала змогу створити критерії ідентифікування механізмів руйнування неармованих та армованих фіброволокнами композитів із цементною матрицею.

1. Wang D., Ju Ya., Xu L. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt and polypropylene fiber. *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 197. P. 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181>

2. Tsangouri E., Aggelis D. G. A review of acoustic emission as indicator of reinforcement effectiveness in concrete and cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 224. P. 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.042>

3. Skalskyi V., Stankevych O., Zosel T., Vynnytska S., Thomas H., Pich A. Ranking of fiber composites by estimation of types and mechanisms of their fracture. *Eng. Fract. Mech.* 2020. Vol. 235. 107147. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2020.107147>

4. Скальський В.Р., Клим Б.П., Плахтій Р.М., Почапський Є.П., Станкевич О.М., Толопко Я.Д., Великий П.П. Портативна система SKOP-8М для вимірювання та аналізу сигналів акустичної емісії. *Наука та інновації*. 2010. Т. 6. № 3. С. 20–29.

5. Stankevych O., Skalsky V. Investigation and identification of fracture types of structural materials by means of acoustic emission analysis. *Eng. Fract. Mech.* 2016. Vol. 164. P. 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2016.08.005>

УДК 621.311.22

О.Ю. Черноусенко, д-р техн. наук, проф.

Д.В. Риндюк, канд. техн. наук, доц.

В.А. Пешко, канд. техн. наук

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(Київ, Україна, tes@kpi.ua)*

СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСООЩАДНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОБЛОКІВ

Характерною особливістю енергетичних систем багатьох країн Європи є недостатня кількість високоманеврових потужностей у загальному енергогенеруючому балансі. Це призводить до необхідності залучати до роботи енергоблоки потужністю 200-300 МВт в піковій-напівпіковій частині графіка електричних навантажень. Проте таке обладнання не проектувалось для роботи в частих змінних режимах. Порушення регламентів експлуатації, викликане необхідністю надмірно частих пусків та зупинок обладнання, призводить до різкого зменшення терміну експлуатації вказаних енергоблоків [1].

Тому пріоритетним завданням стає визначення ресурсних показників даних енергоблоків, з метою встановлення допустимості їх подальшої роботи за частих змінних режимів. Окрім цього, доцільним є застосування методів управління ресурсом, що дозволяють уповільнити темпи накопичення пошкоджуваності в основному металі енергетичного обладнання [2].

Враховуючи значну кількість суттєвих факторів, що впливають на пошкоджуваність і залишковий ресурс, виникає необхідність визначити їх оптимальний, або, як мінімум, раціональний розподіл. Високу ефективність впровадження результатів прогнозуючої оптимізації в енергетиці доводять роботи [3, 4].

Мета роботи – створення системи оцінки та прогнозування раціональних ресурсоощадних режимів роботи високотемпературних елементів енергетичного обладнання.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- накопичити та статистично обробити дані по напрацюванню конкретних енергоблоків ТЕС (число пусків; кількість пусків для найбільш характерних режимів експлуатації; загальне напрацювання);
- визначити допустиме число циклів по різним типам пусків на підставі технічного аудиту і даних щодо реальних умов експлуатації за весь період роботи, а також діагностичного контролю основного металу;
- створити математичну модель прогнозування раціональних ресурсоощадних режимів роботи та здійснити її програмну реалізацію.

В якості бази для розробки системи оцінки та прогнозування запропоновано підхід заснований на [5]: «математична модель – інтелектуальна

експертна система – система автоматизованої оцінки та прогнозування», яку схематично представлено на рис. 1.

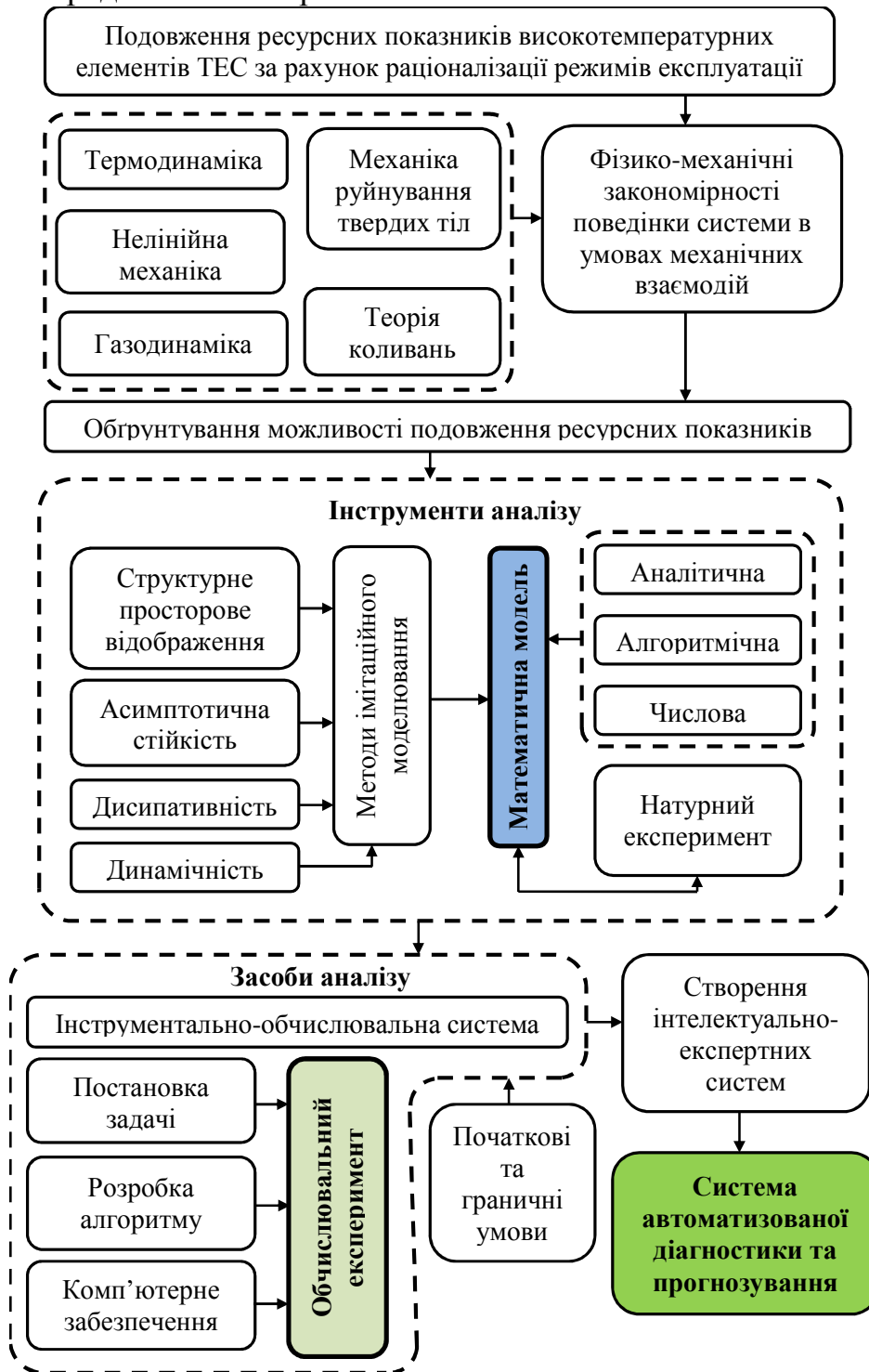


Рис. 1. Принципова схема системи оцінки та прогнозування ресурсоощадних режимів роботи

За період з 2004 до 2019 року, авторами проведено значну роботу з накопичення та статистичної обробки даних із напрацювання конкретних енергоблоків ТЕС України. Отримано масив даних по числу пусків, їх дольовому розподілу для різних теплових станів, тривалості роботи на певних електричних навантаженнях, загальному напрацюванню обладнання.

Розробку математичної моделі можна представити послідовністю наступних кроків:

1. Формулювання аналітичних залежностей, що містять параметри, які описують розрахункову схему об'єкта дослідження. Ці співвідношення повинні мати вигляд замкнутої системи рівнянь, що описують поведінку об'єкта дослідження в реальних просторово-часових координатах.

2. Розв'язок сформульованої задачі та розробка послідовності дій (алгоритму) перетворення вхідних параметрів у вихідні.

3. Реалізація розробленого алгоритму у вигляді комп'ютерної програми, метою якої є забезпечення автоматизації проведення обчислювальних експериментів.

Кожний з вищезгаданих етапів представляє собою окрему, іноді, досить складну задачу. Результатом виконання кожного з вказаних етапів будемо вважати створення відповідно трьох взаємозв'язаних моделей – аналітичної, алгоритмічної та цифрової. Описання алгоритму створення та безпосередньо самих моделей представлено в [6].

Окремої уваги потребує проведена авторами побудова аналітичної залежності між приведеною деформацією ε_a^{red} та допустимим числом циклів N_D для сталі 25X1M1ФА на основі математико-статистичного аналізу експериментальних даних. Обравши в якості базової апроксимуючої функції модифіковане рівняння Стейнхарта-Харта, отримано вказану вище залежність, що у загальному випадку має вигляд:

$$N_D = \frac{t(1 + t + \varepsilon_a^{red})}{1 + \ln \varepsilon_a^{red} + \ln^3(\varepsilon_a^{red})}. \quad (1)$$

Наступним кроком, до розв'язання пропонується задача оптимізації, яка полягає у визначенні такого розподілу конструктивно-технологічних параметрів, що забезпечують максимальне збереження ресурсу обладнання. Як цільову функцію задачі оптимізації обрано залишковий ресурс G .

$$G(\vec{x}) \rightarrow \max_{\vec{x} \in \vec{X}} G(\vec{x}) \quad (2)$$

Розв'язком поставленої задачі оптимізації буде така точка хорт $\in X$, що $G(\vec{x}^{opt}) \geq G(\vec{x})$ для всіх $x \in X$. Розгорнуте описання задачі пошуку оптимального розподілу режимних параметрів роботи енергетичного обладнання на основі математичного програмування представлено в [6].

Наведена вище система оцінки та прогнозування раціональних режимів експлуатації була апробована на устаткуванні енергоблока потужністю 200 МВт, що вичерпав свій проектний ресурс 220 тис. год. При цьому число пусків відповідає парковому значенню – 800, з яких 50 % – пуски з гарячого стану металу, 20 % – з неостиглого, 30 % – з холодного. Отримані результати у вигляді контурних графіків представлено на рис. 2.

У розглянутому випадку найбільш раціональним режимом експлуатації, що здатний забезпечити найвищу довговічність і ресурсозбереження є напівбазовий режим. Раціональні значення експлуатаційних параметрів складають: число годин роботи на рік – 3000-4400 год, число пусків-зупинок

протягом року – 48–64, з дольовим розподілом за різними типами: з ХС – 28–52 %, НС – 0–20 %, ГС – 28–48 %.

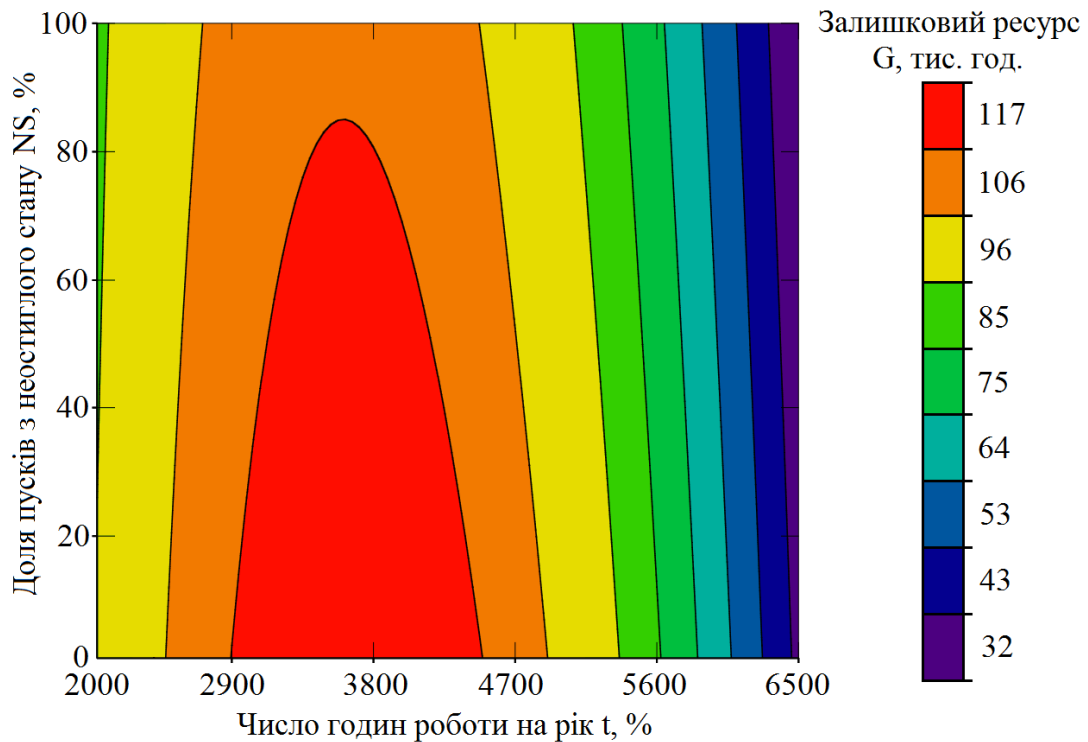


Рис. 2. Діаграма залишкового ресурсу в залежності від експлуатаційних параметрів для енергоблока 200 МВт, що вичерпав свій парковий ресурс

1. Черноусенко О.Ю., Пешко В.А. Вплив роботи енергоблоків ТЕС в маневреному режимі на вичерпання ресурсу енергетичного обладнання. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 10 (1182). С. 6–16. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.08.14>
2. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Goryazhenko V. Development of a technological approach to the control of turbine casings resource for supercritical steam parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2. Iss. 1 (92). P. 51–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126042>
3. Lan Wang, Eric Wai Ming Lee, Richard K.K. Yuen, Wei Feng. Cooling load forecasting-based predictive optimisation for chiller plants. *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 198. P. 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.016>
4. Stoppato A., Mirandola A., Meneghetti G., Lo Casto E. On the operation strategy of steam power plants working at variable load: technical and economic issues. *Energy*. 2012. Vol. 37. Iss. 1. P. 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.042>
5. Штефан Є. В., Риндюк Д. В., Кадомський С. В. Математичне моделювання процесів механічного оброблення дисперсних органічних матеріалів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. № 2/12 (68). С. 55–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23718>
6. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Chernov S., Goryazhenko V. Development of a System for Estimating and Forecasting the Rational Resource-Saving Operating Modes of TPP. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3. No. 8 (105). P. 14–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204505>

УДК 539.3

М.Г. Шultzенко¹, д-р техн. наук, проф.

О.Ф. Поліщук¹

Ю.Г. Єфремов², канд. техн. наук

К.В. Аврамов¹, д-р техн. наук, проф.

¹ Інститут проблем машинобудування НАН України ім. А.М. Підгорного
(Харків, Україна, shulzh@ipmach.kharkov.ua)

² ТОВ «СКБ «Вібрації та ресурсу»
(Харків, Україна, iefremov.ua@gmail.com)

ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВУЗЛІВ ТУРБОАГРЕГАТІВ

Сучасний рівень розвитку мікроелектроніки дозволяє створити інтелектуальні датчики та спеціалізовані пристрої неруйнівного контролю, що забезпечують необхідний рівень метрологічних та експлуатаційних характеристик у режимі реального часу.

Актуальність роботи пов'язана з підвищенням надійності та безпеки експлуатації енергетичного обладнання, яке на багатьох електростанціях України знаходиться на межі вичерпання ресурсу та працює як у стаціонарному, так і на перехідних режимах.

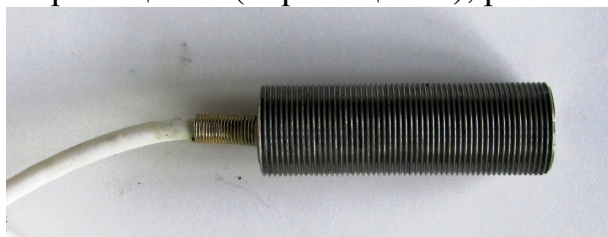
Метою роботи є створення новітніх інтелектуальних датчиків та спеціалізованих пристроїв для оцінки наявного технічного стану обладнання агрегатів та вузлів ТЕС та ТЕЦ України.

Створено інтелектуальні датчики вібропереміщення та віброшвидкості для оцінки вібраційного стану необертювих та обертювих частин обладнання. Датчики складаються з первинних та функціональних перетворювачів.

Відмінність нового вихорострумювого первинного перетворювача від раніше створених полягає в тому, що в ньому використано додаткові елементи для забезпечення функції компенсації впливу температури (датчик температури, мікроконтролер типу PIC10). Для мікроконтролера первинного перетворювача розроблено програму обробки сигналу з температурного датчика та формування значення температури у цифровому вигляді. Розмір та форма вимірювальної котушки індуктивності первинних перетворювачів впливають на діапазон вимірювання вібропереміщення (переміщення), рис. 1.



а



б

Рис. 1. Зовнішній вигляд первинних перетворювачів: а – V-01.1; б – V-01.2

Функціональний перетворювач призначений для цифрової обробки сигналу первинного перетворювача та видачі інформації у аналоговому та цифровому вигляді. Функціональний перетворювач включає наступні модулі:

- вхідний модуль для подачі електроживлення на первинний перетворювач, посилення і обмеження частотно-модульованого сигналу;
- мікроконтролер типу STM32 для обробки сигналу первинного перетворювача;
- вихідний модуль для нормування сигналу, пропорційного вимірюваній величині [1].

Створено пристрій діагностування вібраційного стану енергетичного обладнання, який має функції моніторингу, візуалізації, аналізу параметрів коливань та архівації даних на постійному носії. За результатами випробування інтелектуальних датчиків вібрації в умовах ТЕЦ розроблено нове програмне забезпечення для мікроконтролерів функціональних перетворювачів, що дозволило розширити функціональні можливості створених датчиків [2]. Проведено модернізацію пристроїв контролю середньоквадратичних значень віброшвидкості опор автоматизованих систем вібродіагностики турбоагрегата К-300-240 (енергоблоки 1,3,4 Трипільська ТЕС) та отримано відповідні метрологічні документи на системи.

Створені інтелектуальні датчики віброшвидкості з однокомпонентним вихорострумовим первинним перетворювачем використовуються для контролю вібрації опор трьох турбоагрегатів К-300-240. Вимірювання проводяться паралельно на всіх опорах турбоагрегата у трьох напрямках (вертикальному, горизонтально-поперечному та осьовому). Для реєстрації вібраційних параметрів датчики підключаються до робочої станції штатної автоматизованої системи вібродіагностики (АСВД). При перетворенні аналогового сигналу з інтелектуальних датчиків віброшвидкості у цифровий сигнал використовується плата АЦП Е-14-440 (виробництва LCard) робочої станції системи. З аналогового виходу інтелектуальних датчиків сигнал по напрузі подається на вхід плати АЦП Е-14-440. Реєстрація вібропараметрів здійснюється з використанням програмного забезпечення АСВД турбоагрегата.

Датчики вібропереміщення використовуються на турбоагрегатах К-300-240, К-200-130 та Т-250/300-240. За їх допомогою отримуються спектральні характеристики вібропереміщення роторів турбоагрегатів і тренди розмаху вібропереміщення контактних кілець щітково-контактних апаратів, а також осьові зсуви та відносні розширення роторів.

Створені інтелектуальні датчики, пристрої та системи діагностування можуть бути застосовані для діагностування технічного стану інших об'єктів промисловості.

Створено вихорострумовий пристрій для виявлення тріщин у нарізних з'єднаннях вузлів енергетичного та транспортного обладнання (рис. 2, а) та експериментальний зразок вихорострумового пристрою для виявлення тріщин у теплових канавках роторів (рис. 2, б) [3].



Рис. 2. Вихорострумові пристрої

Експериментальними дослідженнями створених вихорострумових перетворювачів та їх удосконаленням досягнуті амплітудні та фазові характеристики, що забезпечують виявлення дефектів глибиною до 4 мм – для феромагнітних та до 10 мм – для неферомагнітних металів.

У пристрої для виявлення тріщин у теплових канавках роторів використовується спеціально розроблений вихорострумовий перетворювач на Ш-подібному феритовому осерді. Експериментальні дослідження таких перетворювачів показали їх високу чутливість до дефекту із допустимим робочим зазором до 4 мм при контролі деталей з феромагнітних металів. Наявність такого зазору важлива тому, що в процесі експлуатації турбоагрегата в теплових канавках з'являються різного роду нашарування, які заважають проведенню якісної дефектоскопії. Профіль перетворювача повторює форму теплової канавки, товщина робочої частини разом з екраном – 3 мм. Сигналізація про наявність тріщини – світлова та звукова. Пристрій успішно випробувано на зразку з імітацією теплової канавки при виявленні в ній штучної тріщини.

1. Створення та випробування на ТЕС України інтелектуального датчика для оцінки вібраційного стану необертових частин обладнання: звіт про НТР (проміжний) / Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України; керівник М.Г. Шульженко. Харків, 2016. 35 с. № ДР 0116U006390.

2. Створення та випробування на ТЕС України інтелектуального датчика для оцінки вібраційного стану необертових частин обладнання: звіт про НТР (проміжний) / Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України; керівник М.Г. Шульженко. Харків, 2017. 40 с. № ДР 0116U006390.

3. Використання розроблених датчиків для оцінки вібраційного стану агрегатів. Розробка пристрою для контролю наявності тріщин в нарізних з'єднаннях енергетичного обладнання: звіт про НТР (проміжний) / Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України; керівник К.В. Аврамов. Харків, 2019. 44 с. № ДР 0116U006390.