

ОСОБЛИВОСТІ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ОЦІНЦІ СТАНУ МАТЕРІАЛІВ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, О.І. Бойчук, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко

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

На основі проведених досліджень сформульована гіпотеза, яка показує, що акустична емісія є дзеркальним відображенням, і, отже, акустичним паспортом характеристик матеріалів, що змінюються в процесі експлуатації, і, зокрема, їх механічних властивостей. Використання цієї гіпотези перевірено на практиці і дозволяє прогнозувати руйнівне навантаження матеріалу без зупинки експлуатації і без необхідності попереднього знання початкових значень механічних властивостей матеріалів. Відповідно до представленої гіпотези, АЕ відображає не самі властивості матеріалу, а їх зміну, і автоматично адаптується до таких змін, незалежно від типу матеріалу. Експерименти, проведені з численними матеріалами, що відрізняються своїми фізичними характеристиками, в тому числі сталлями різних класів, алюмінієвими сплавами, бетонами і композитами, показали, що граничне навантаження при руйнуванні цих матеріалів за даними АЕ визначається за однаковим алгоритмом з похибкою, пов'язаною лише з технічними особливостями засобів вимірювання. Накопичений досвід дозволив перейти до створення інтелектуальної технології оцінки стану матеріалів конструкцій при їх експлуатації і АЕ систем на її основі. Такі системи вже отримали широке застосування при безперервному моніторингу стану конструкцій у виробничих умовах. Бібліогр. 10, рис. 8.

Ключові слова: акустична емісія, прогнозування руйнівного навантаження, фізичні характеристики матеріалів, вектор стану матеріалу, пошкодженість, ресурс

Аналізуючи явище АЕ, що виникає при розвитку руйнування матеріалів, дослідники прийшли до висновку, що її виникнення пов'язане з швидкою перебудовою структури матеріалів у результаті їх деформації під впливом збуджуючих полів. Дані, отримані за допомогою АЕ, підтверджують цю залежність і дозволяють, як мінімум, якісно оцінювати зміни структури матеріалу. В матеріалі в процесі деформування або експлуатаційного напруження, причому одне не виключає іншого, виникають і накопичуються пошкодження¹. На цей час оцінка пошкодженості використовується як в розрахунках міцності, так і в наближених якісних оцінках, де очікується зміна структури матеріалів під дією будь-яких силових або інших полів [1].

У зв'язку з тим, що дедалі збільшується обсяг застосування АЕ для оцінки стану матеріалів конструкцій, постає питання про більш жорстке нормування інформації АЕ, яка виникає під час розвитку руйнування. Сучасні способи подання АЕ інформації існуючою вимірювальною апаратурою вимагають оригінального підходу при її застосуванні і створення відповідних методик для того, щоб виділити з усього потоку АЕ інформації певну частину, яка характеризує розвиток руйнування і може бути нормована за цілком певними параметрами.

Багаторічні дослідження в цьому напрямку дозволили сформулювати такі параметри, дати

їм оцінку існуючими методами фізичного аналізу і застосувати при діагностичному контролі стану матеріалів конструкцій у процесі експлуатації. Різноманітні впливи на матеріал (механічні, теплові, хімічні та ін.) можуть призвести до досить швидких локальних змін його структури, що і є джерелом АЕ.

Слід особливо відзначити великий вплив на зміну структури матеріалів різних хімічних реакцій і мікрофізичних перетворень, що протікають у матеріалах конструкцій, викликаних впливом атмосфери або активністю продукту, що транспортується або зберігається у виробках з цих матеріалів. Наприклад, газ, що транспортується по трубопроводах, в результаті динаміки процесу складається з суміші різних компонентів, включаючи водень [1]. Атоми водню, що мають малі, в порівнянні з пустотами кристалічної решітки, розміри, проникають всередину матеріалу, де обмінюються енергією на поверхнях мікрodefектів, завжди наявних у матеріалі, і перетворюються на молекули, які мають значно більші, порівняно з атомом, розміри. Молекули газу поступово локально накопичуються в матеріалі, створюючи надмірний тиск і утворюючи порожнини, а потім і тріщини. Локальні напруження можуть перевершити міцність матеріалу в цьому місці, внаслідок чого відбувається різке зростання тріщини. Процес цей може повторюватися скільки

¹ Під пошкодженнями тут розуміються будь-які зміни в структурі матеріалів. Динамічну складову цих змін реєструє акустична емісія Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Бойчук О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, О.І. Бойчук, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, 2020

завгодно довго до тих пір, поки тріщина не досягне розмірів, при яких почнеться руйнування трубопроводу.

Перераховані вище і багато інших чинників викликають зміну властивостей матеріалу конструкції, а АЕ є їх показником, дзеркальним відображенням або, іншими словами, акустичним паспортом його властивостей, в тому числі механічних, фізико-хімічних, і характеру навантаження. Найголовніше ж полягає в тому, що для оцінки стану матеріалу з використанням його акустичного паспорта не потрібно знати марку матеріалу, його геометричні розміри і характер навантаження. АЕ в даному випадку виступає як кількісна міра пошкодженості матеріалу незалежно від того, що це за матеріал.

На першому етапі досліджень щодо застосування АЕ для оцінки стану матеріалів на основі стандартів технічної діагностики була розроблена методика побудови параметрів АЕ, які можуть бути використані при створенні необхідних алгоритмів оцінки стану. На базі цієї методики була доопрацьована апаратура ЕМА-4 (Evaluation of Materials Ability), програмне забезпечення якої отримало маркування ЕМА-3.92 і дозволяє, після спеціальної обробки сигналів АЕ, отримати вектор стану матеріалу (ВСМ) більш широкого складу, різні комбінації якого будуються програмою автоматично в залежності від ситуації, що склалася у процесі руйнування. ВСМ включає наступні АЕ параметри.

Виміряні параметри:

1. Зовнішні силові поля: P – поточне навантаження, кг, або тиск, МПа; T – температура, °С.
2. A – максимальна амплітуда у групі подій АЕ за момент часу, що розглядається, дБ. Умовно характеризує об'єм дефекту, що утворився.
3. Rt – найбільший час зростання амплітуди до максимуму у групі подій АЕ за момент часу, що розглядається, мкс; W – найбільша тривалість події, мкс. Характеризує зміцнення матеріалу в процесі його деформування.
4. O – число осциляцій в події АЕ. Характеризує кількість пошкоджень, що виникли в даний момент часу.

Параметри, побудовані на базі виміряних:

5. Ac – сумарна амплітуда подій АЕ за час випробувань, дБ. Характеризує загальний об'єм пошкоджень, що утворилися.
6. Os – сумарне число пошкоджень в матеріалі за проміжок часу, що розглядається, що визначається за сумою осциляцій подій АЕ.
7. Nc – накопичені в процесі руйнування події АЕ. Характеризують загальне число пошкоджень,

що виникли за проміжок часу, що розглядається; може не збігатися з Os .

8. A^2 – характеризує енергію, витрачену на утворення дефекту, Дж.

9. Ac^2 – характеризує сумарну енергію АЕ, витрачену на руйнування, Дж.

10. N – сума подій АЕ у даний момент часу. Характеризує число дефектів, що виникли у даний момент часу; може не збігатися з Os .

11. X, Y – усереднені з заданою ймовірністю координати суми подій, що виникли в даний момент часу на певній ділянці зразка або конструкції, мм. Розмір ділянки задається автоматично в залежності від розмірів об'єкта контролю та схеми розташування датчиків АЕ.

Дослідження, які передбачають отримання акустичних паспортів (раніше – «портретів») матеріалів на стадіях руйнування, починаючи від старту тріщини і закінчуючи повним поділом матеріалу на частини, були розпочаті авторами ще в 90-ті роки за участю фахівців Інституту проблем міцності НАН України ім. Г.С. Писаренка. У відділі статичної міцності акад. А.А. Лебедєвим та проф. М.Г. Чаусовим був розроблений метод отримання повних діаграм деформування з використанням жорсткого навантаження зразків². Жорсткість навантаження, на відміну від такої для стандартних розривних машин (близько 3 т/мм), відрізнялася істотно (до 18 т/мм). Це дозволило відстежувати стадійність виникнення і зростання тріщини аж до повного руйнування. Застосування при таких випробуваннях методу АЕ дозволило досягти суттєвих результатів щодо встановлення зв'язку параметрів АЕ зі стадійністю руйнування.

Випробування проводили на круглих малогабаритних зразках довжиною від 80 до 200 мм з діаметром різьбової захватної частини 14 мм і різними типами концентраторів – круговими виточками радіусом 5, 10 і 20 мм, кутовими виточками 45, 90 та 120°, а також гладкими, без концентратора.

На рис. 1, а узагальнено показано поведінку АЕ на різних стадіях руйнування. Такі дані характерні для ряду сталей, включаючи сталь 3, сталь 20, 15Х2МФА, мартенситно-старіючу сталь ВНС25, алюмінієвих сплавів типу АМц і ряду інших матеріалів [2]. Представлена тільки заключна частина діаграми деформування, починаючи від моменту досягнення межі міцності в точці В. Суцільна крива деформування P закінчується в точці К, яка відповідає моменту старту тріщини за механізмом в'язкого відриву. Далі відбувається перехід до в'язкого зсуву (точка а) і потім до змішаного механізму відриву і зсуву (точка б). Крива деформування на стадії росту тріщини показана пунктиром.

² Жорстке навантаження характеризується постійною, рівномірною, незалежною від навантаження деформацією матеріалу при його розтягуванні аж до руйнування.

На рис. 1 представлені схематично два параметра АЕ, які реєстрували на заключних стадіях деформування: A – обвідна амплітуд подій дискретної АЕ; A_v – неперервна АЕ, що має характер постійного шуму. Чітко видно, що зміни дискретної АЕ відповідають зміні механізмів руйнування. Перший пік A_1 виникає в момент старту тріщини і закінчується при переході до зсуву, другий пік A_2 виникає при переході до змішаного механізму і закінчується незадовго до руйнування. Неперервна АЕ (A_v), починаючи від точки В і до закінчення другого піку A_2 , є умовно постійною. Остаточне руйнування характеризується стрибкоподібним її ростом (A_v+). Фактично, отриманий узагальнений портрет АЕ при руйнуванні ряду матеріалів. У той же час, випробування кожного конкретного зразка або конструкції мають свої особливості в величинах параметрів A і A_v і їх розподілу в часі. Дане дослідження показало, що як мінімум на заключних стадіях деформування можна отримувати «акустичні паспорти» для досліджуваних матеріалів.

Відзначимо також ряд цікавих ефектів, пов'язаних з впливом пластичності матеріалів на заключ-

ні ділянки діаграм деформування і відповідну їм АЕ. В міру окрихчування матеріалу і вичерпання ним пластичних властивостей низхідна ділянка діаграм деформування стає все коротшою. Число подій АЕ відповідно зменшується, піки амплітуд стають більш вираженими, величина амплітуд подій АЕ для того ж самого матеріалу зростає (див. рис. 1, б, в). Зрештою, для матеріалів, руйнування яких є повністю крихким, заключну частину діаграми не вдається отримати навіть при максимально використанні в даній серії експериментів жорсткості випробувальних машин. На пружній висхідній ділянці такої діаграми події АЕ, як правило, не реєструються аж до руйнування при використанні малогабаритних зразків. Руйнування ж супроводжується єдиною подією АЕ високої потужності, після чого відразу ж відбувається стрибок неперервної АЕ (рис. 1, в).

Встановлено, що АЕ на заключних стадіях деформування чітко відображає, якісно і кількісно, властивості випробуваних матеріалів, реагуючи на жорсткість навантаження, тип концентратора і пластичні властивості матеріалів. У роботі [2] по-

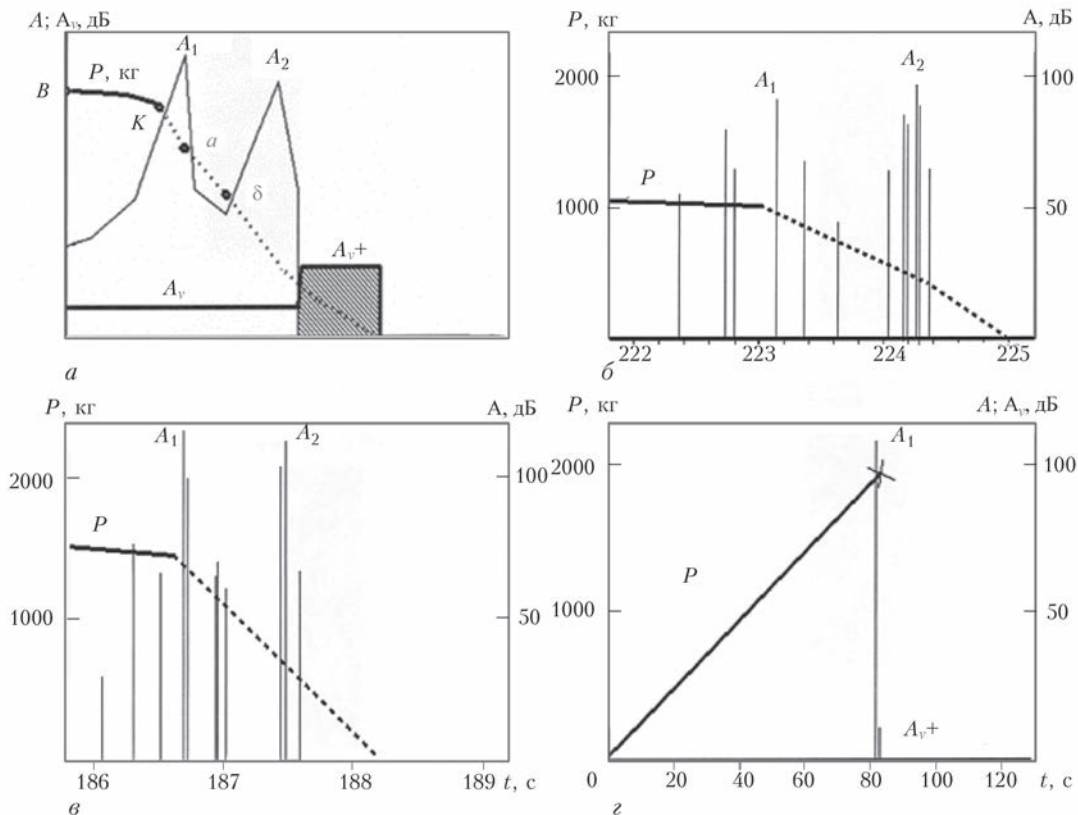


Рис. 1. Зміна параметрів АЕ, що реєстрували на заключних стадіях деформування: а – типовий розподіл у часі АЕ на стадіях виникнення і зростання тріщини, зіставлений з завершальною частиною повної діаграми деформування; далі типові розподіли АЕ у часі в залежності від навантаження при випробуваннях зразків з круговою виточною $R = 5$ мм; б – корпусна сталь 15Х2МФА у стані, що використовується в корпусах реакторів (КП60); в – ця ж сталь після спеціальної термообробки (КП100), що імітує радіаційне окрихчування внаслідок експлуатаційного напруження реактора³; г – інструментальна сталь 65Г, загартована до HRC 60

³ Корпусна сталь 15Х2МФА в стані, що використовується в корпусах реакторів і після спеціальної термообробки, що імітує радіаційне окрихчування внаслідок експлуатаційної напруження, була надана у вигляді заготовок для зразків підприємством ОКБ «Гидропресс» (Подольск, РФ), який розробляв рішення для атомної енергетики.

казано і описано відповідними рівняннями багато залежностей такого роду. З огляду на те, що всі їх не можливо показати в рамках однієї статті, зупинимося на одній з найбільш важливих. Амплітуда піку подій дискретної АЕ, приведена до відносного звуження шийки зразка в момент старту тріщини, корелює з коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{lc} (рис. 2). Оскільки в проведених дослідженнях використовували повні діаграми деформування, в якості аналогу K_{lc} використовували параметр K_p , що добре корелює з ним, який визначається за параметрами низхідних ділянок повних діаграм деформування зразків [3] за формулою

$$K\lambda = \frac{S_K l_p E}{2(1 - \psi_K)}$$
 де S_K – площа поперечного перерізу зразка в момент старту тріщини; Δl_p – відносне подовження; E – модуль пружності; ψ_K – відносне звуження шийки зразка.

Залежності, подібні показаним на рис. 2, були отримані і для низки інших металів. Вибір сталі 15Х2МФА в даному випадку показовий тим, що найбільший обсяг даних, включаючи варіювання пластичними властивостями і типами концентраторів напружень, був отриманий саме для цього матеріалу.

Показані на рис. 1, 2 дані, по-перше, дають переконливе підтвердження чіткого взаємозв'язку між зміною механічних властивостей матеріалів і АЕ; по-друге, дозволяють говорити про можливе кількісне використання даних АЕ для оцінки стану матеріалів.

Слід ще раз зробити акцент на тому, що АЕ відображає не механічні властивості матеріалу як такі, а їх динамічну зміну, викликану пошкоджуваністю матеріалу, незалежно від причини пошкодження.

Природно, для конструкцій, що знаходяться в експлуатації, важливо не допустити переходу до заключної стадії деформування, що супроводжується зростанням тріщини і подальшим руйнуванням. У зв'язку з цим дослідження початкових стадій накопичення пошкоджень як на зразках, так і на конструкціях, являє собою вкрай важливе завдання. Розпізнавання небезпечного ступеня пошкоженості конструкцій при дотриманні коректних умов переходу може бути виконано, по-перше, за дани-

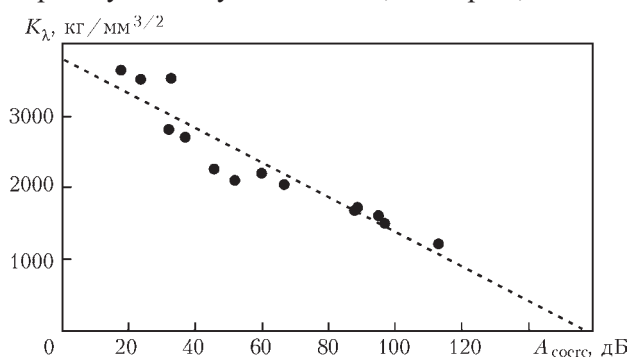


Рис. 2. Приклад кореляції зведених до площі зразка амплітуд АЕ в момент старту тріщини A_{corec} з аналогом коефіцієнта інтенсивності K_λ для сталі 15Х2МФА

ми випробувань зразків, по-друге, на основі математичних моделей накопичення пошкоджень. Можливе використання обох підходів одночасно з вибором з отриманих результатів найбільш небезпечного.

Якщо зібрати на єдиному графіку перераховані вище вимірювані і похідні від них параметри АЕ, зіставивши їх з кривою навантаження, можна отримати візуальне уявлення про те, що являє собою акустичний паспорт матеріалу.

На рис. 3 представлена типова картина АЕ, що виникла в матеріалі зразка, в даному випадку зі сталі Х18Н9, що випробовувався на розтяг в машині з жорстким навантаженням.

Графік на рис. 3 містить практично всю необхідну інформацію щодо характеру процесу руйнування сталі Х18Н9, що використовується в розрахунку руйнівного навантаження та залишкового ресурсу матеріалу. Досить наочно показано нерівномірний розвиток руйнування протягом всього періоду деформування зразка. Видно, як зростає кількість пошкоджень (на графіку – синя крива), як змінюється жорсткість матеріалу в місці виникнення пошкоджень (на графіку – стовпчики бузкового кольору). Наочно видно умовний об'єм дефектів, що виникають (стовпчики зеленого кольору). Також наочно представлені координати дефектів, що виникають (точки чорного кольору). Вся інформація представлена на фоні зростаючого до межі міцності, а потім падаючого після старту тріщини випробувального навантаження (крива червоного кольору) [4, 5].

Являючи собою акустичний паспорт, що дзеркально відображає зміни стану матеріалу конструкцій, АЕ має серйозні переваги в оцінці його стану, оскільки дозволяє прогнозувати руйнівне навантаження матеріалу в процесі експлуатації без необхідності попереднього знання початкових значень його механічних властивостей. АЕ автоматично адаптується до його властивостей, що змінюються, незалежно від типу матеріалу. Багаторічні експерименти, проведені з численними матеріалами, що відрізняються своїми фізичними характеристиками, в тому числі різними металами, бетонами, як і дослідження деяких композитів [6], показали, що граничне навантаження при руйнуванні цих матеріалів за даними АЕ визначається за одним і тим самим алгоритмом з похибкою, що пов'язана лише з можливостями засобів вимірювання.

Накопичений досвід дозволив перейти до створення інтелектуальної технології оцінки стану матеріалів конструкцій при їх експлуатації (SHM – Structural Health monitoring) і АЕ систем на її основі. Такі системи вже отримали широке застосування при безперервному моніторингу стану конструкцій у виробничих умовах [7–9].

Для створення такої технології потрібні були спеціальні аналітичні розробки, які, поряд з екс-

периментальною інформацією, що надходить з контрольованої конструкції, дозволять зв'язати параметри хвиль АЕ, що виникають в матеріалі, з його поточним станом.

Для аналітичного розв'язання даної проблеми найбільш прийнятним є метод розпізнавання образів (Pattern Recognition Principles), широко застосовуваний при створенні робочих алгоритмів і програм в обчислювальній техніці. Перевага методу полягає у відсутності необхідності використання в розрахунках для контрольованих матеріалів фізичних постійних, що мають широкий спектр значень. При оцінці технічного стану конструкцій це призводить до суттєвого зменшення похибок оцінок у порівнянні з розрахунковими методами.

Методів розпізнавання образів існує досить багато. У використовуваній тут технології вибраний метод найменшої відстані між центроїдами гіпереліпсоїдів (відстань Махаланобіса – Mahalanobis distance), що побудовані на даних подій АЕ і знаходяться в області з постійною щільністю розподілу. Метод виявився найбільш прийнятним, хоча і будувався в n -вимірному просторі, який визначається великою кількістю параметрів, що характеризують подію АЕ, які були зведені в спеціальний ВСМ. Квадрат такої відстані r^2 на малому проміжку часу зміни образу ВСМ можна представити:

$$r_{i,j}^2 = (x_i - m_j)' C^{-1} (x_i - m_j),$$

де x_i , x_j – i -те та j -те значення вектора ВСМ або АЕ подій в точках вимірювання; C^{-1} – обернена коваріаційна матриця сукупності образів.

Розглядається процес поелементно і приймається як міра подібності, якщо присутні статистичні характеристики всіх образів. У деяких випадках цю формулу зручно представити у вигляді квадрата відстані між математичними очікуваннями зафіксованих подій АЕ, що розглядаються в створених на їх основі кластерах.

$$r_{i,j}^2 = (m_i - m_j)' C^{-1} (m_i - m_j),$$

де m_i , m_j – математичні очікування сукупностей ВСМ (кластерів), побудованих для різних значень АЕ; C^{-1} – обернена коваріаційна матриця сукупності образів. Приймається однаковою для всіх образів.

Зазначена методика дозволила побудувати на основі безперервного моніторингу алгоритм оцінки стану матеріалу конструкцій в процесі їх експлуатації. На рис. 4 представлена блок-схема роботи обчислювальної системи при прийнятті рішення щодо стану конструкції.

Як видно на рис. 4, повний пакет інформації щодо стану матеріалу (в даному випадку трубопроводів) надходить в обчислювальний блок, де обробляється з виділенням істотних параметрів

за ваговими характеристиками. Далі створюється основний розрахунковий блок ВСМ, що надходить в блок вчителя. У цьому блоці відбувається порівняння основного блоку інформації, що надійшла, з еталонами стану. При появі нев'язки інформація передається в блок самонавчання, де коригується попаданням в діапазон помилок $\pm 15\%$ при ймовірності оцінок 0,95. Скориговані результати направляються в блок мінімалізації для вибору рішення.

У розроблених алгоритмах для діагностичних систем ЕМА вирішення завдання прогнозу являє собою послідовність кроків з обробки початкової вимірюваної інформації, подібної до наведеної на рис. 3, з метою встановлення ступеня небезпеки та оціночного розрахунку руйнівного навантаження із заданою достовірністю, а потім на базі цих даних отримання кількісних показників пошкодженості і межі міцності матеріалу контрольованого об'єкту. Інформація щодо оцінки стану матеріалу відображується у кольоровому та кількісному вигляді на індикаторах небезпеки.

Результат прийнятого щодо стану матеріалу рішення передається у діагностичний центр підприємства і головної контролюючої організації, де відбувається автоматичний загальний аналіз і фіксування стану конструкції, оцінюється її залишковий ресурс і видаються рекомендації щодо можливої подальшої її експлуатації із зазначенням найбільш небезпечних ділянок. Оцінка стану конструкції може здійснюватися незалежно від того, де вона розташована. Інформація щодо її стану по мережі інтернет завжди може передаватися в головний діагностичний центр (рис. 4) безперервно або з певною періодичністю, встановленою відповідною нормативною документацією.

Прогноз руйнівного навантаження, ступеня пошкодженості і залишкового ресурсу матеріалу визначаються автоматично з використанням наведеної вище методики. На рис. 5 показані два моменти зняття інформації при випробуваннях трубопроводу гарячого промперегріву пари (сталь 15Х1М1Ф) системою АЕ моніторингу, встановленої на одній з теплових станцій. Це типовий приклад SHM технології в дії. Для оператора системи інформація щодо пошкодженості і ресурсу об'єкта контролю не потрібна, але ці дані зберігаються і, за необхідністю, можуть бути затребувані в будь-який момент. Як правило, вони потрібні фахівцям в області міцності для вирішення питання про подальше подовження терміну експлуатації виробу. Проте, має сенс пояснити, як саме розраховується пошкодженість. Для цього потрібне знання поточного навантаження і прогнозу руйнівного навантаження. Трубопровід працює при навантаженні 22 ат. На рис. 5 представлені значення прогнозу руйнівного навантаження для трьох локаційних

антен. Для перших двох, показаних на екрані, прогнозоване руйнівне навантаження знаходиться в межах 77,9...89,6 ат., для третьої, якій відповідає помаранчевий індикатор небезпеки 2 рівня «Підвищити увагу», – 46,8...53,8 ат.

Оціночна пошкодженість, яку позначимо як ΔW , для перших двох антен складе, якщо використовувати нижню, більш критичну межу прогнозного навантаження:

$\Delta W = 22/77,9 \times 100 = 28,2 \%$. Для третьої антени $\Delta W = 22/46,8 \times 100 = 47 \%$.

У фахівців, що займаються питаннями пошкодженості, неодноразово виникало питання, яке саме значення пошкодженості слід вважати критичним і неприпустимим для конкретного матеріалу або конструкції. Відповідь на це питання можна отримати при використанні методу АЕ. Зокрема, для того, щоб відповісти на питання, чи є величина пошкодженості 47 %, як найбільша з отриманих при вимірюваннях, критичною з точки зору міцності матеріалу контрольованого трубопроводу, необхідно випробувати зразок з такого ж матеріалу за умов, близьких до його реальної експлуатації в трубах. На рис. 6 наведені на екрані програми ЕМА результати випробування такого зразка при температурі 560 °С. Детально елементи і можливості програми описані в роботі [10]. В даному випадку слід сконцентрувати увагу на індикаторі прогнозу руйнування (Destruction forecast) у верхній частині вікна, який показує червоним кольором, що матеріал досяг критично небезпечного стану, а представлені на ньому прогнозні значення руйнівного навантаження 5091,7...6289,7 кг відповідають реальному руйнівному навантаженню 6033 кг (червона лінія на графіку праворуч). Праворуч від індикатора на сірому фоні показаний відповідний прогнозованому навантаженню результат розрахунку пошкодженості (Damage). Як бачимо, критичні значення пошкодженості для втрати міцності матеріалу складають 95...100 %.

Якщо порівняти результат даного випробування з отриманими даними для трубопроводів, то при пошкодженості 47 % матеріал найбільш пошкодженого трубопроводу має фактично дворазовий запас по міцності. Таким чином, запропоновано метод для оцінки того, яке саме кількісне значення пошкодженості можна вважати критичним для даного матеріалу. Дані, що отримуються таким методом, мають значну цінність при оцінці стану матеріалу діючих конструкцій. Особливо важливо, що для їх отримання потрібне знання лише поточного навантаження і виміряних параметрів АЕ.

Далі слід приділити увагу питанню визначення залишкового ресурсу матеріалу конструкцій. Запропоновано простий і зрозумілий метод для його розрахунку. На основі обчисленого за наве-

деним вище алгоритмом руйнівного навантаження визначають ступінь пошкодженості матеріалу на момент контролю, а потім за цими даними з використанням номограми (рис. 7) визначають залишковий ресурс. Представлена на рис. 7 номограма отримана на підставі декількох сотень повторених п'ятьма незалежними методами випробувань різних матеріалів з накопиченими в результаті експлуатації дефектами і накопиченням в них пошкоджень [9]. Розглянемо спосіб визначення залишкового ресурсу більш докладно. На номограмі пошкодженість виражена не у відсотках, а в вигляді шкали від 0 до 1, де $\Delta W_{сер} = 1$ відповідає пошкодженості 100 %.

Залишковий ресурс $t_{зал}$ виражений в роках. Точки, нанесені на номограму, є частиною експериментальних даних, на підставі яких була отримана основна лінія тренду для визначення ресурсу, і показані для того, щоб підтвердити їх точну відповідність наведеній кривій, яка пов'язує ресурс з пошкодженістю.

Для визначення залишкового ресурсу за відомою пошкодженістю слід відкласти на осі абсцис значення пошкодженості, вираженої за шкалою від 0 до 1, потім провести вертикальну лінію до перетину з кривою. Отримавши точку перетину, необхідно провести горизонтальну лінію вліво до перетину з віссю ординат. Отримане значення ординати і буде шуканим залишковим ресурсом.

З номограми, для прикладу, можна побачити, що пошкодженість 0,13 відповідає залишковому ресурсу ≈ 60 років, а 0,5 – залишковому ресурсу ≈ 20 років.

Слід чітко вказати, що номограма є осередненою, саме тому параметр пошкодженості вказаний як $\Delta W_{сер}$, а отриманий за її допомогою залишковий ресурс – оціночним. Проте, запропоновано достатньо ефективний спосіб оцінки ресурсу, який ґрунтується на досить великому обсязі експериментальних даних. Більш ефективним представляється тільки прямий спосіб оцінки – дочекатися руйнування конструкції, але він вимагає багатьох років очікування, а сам факт руйнування конструкції навряд чи задовольнить підприємство, що її експлуатує.

Вперше автоматизований розрахунок залишкового ресурсу був реалізований на Одеському припортовому заводі (ОПЗ) у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення для сховищ рідкого аміаку типу ST. Розрахунок проводиться двома різними методами, один з яких використовує номограму (див. рис. 7), а другий – лінію тренду, що залежить від зміни прогнозного руйнівного навантаження. Остаточний варіант оціночного ресурсу видається за найменшим з результатів розрахунку. Вікно відповідної програми представлено на

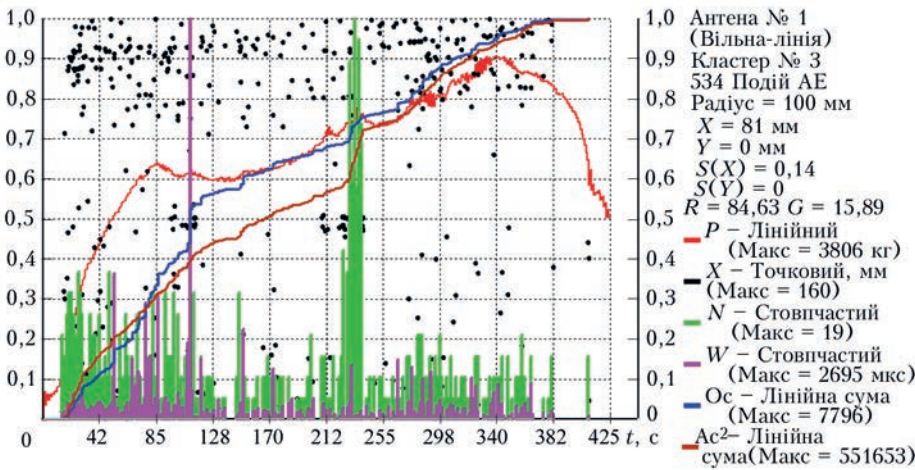


Рис. 3. Розподіл АЕ інформації в зразку зі сталі Х18Н9, отриманою приладом ЕМА-3.92 у всьому об'ємі зразка в залежності від часу. Область контролю 0...160 мм включає різьбові з'єднання в захватах розривної машини. $S(X)$ – помилка визначення координати X , мм. Кількісні значення навантаження P і АЕ параметрів визначаються шляхом множення їх максимальних величин (зазначені в дужках у таблиці з правого боку графіка) на значення відносної величини на осі ординат

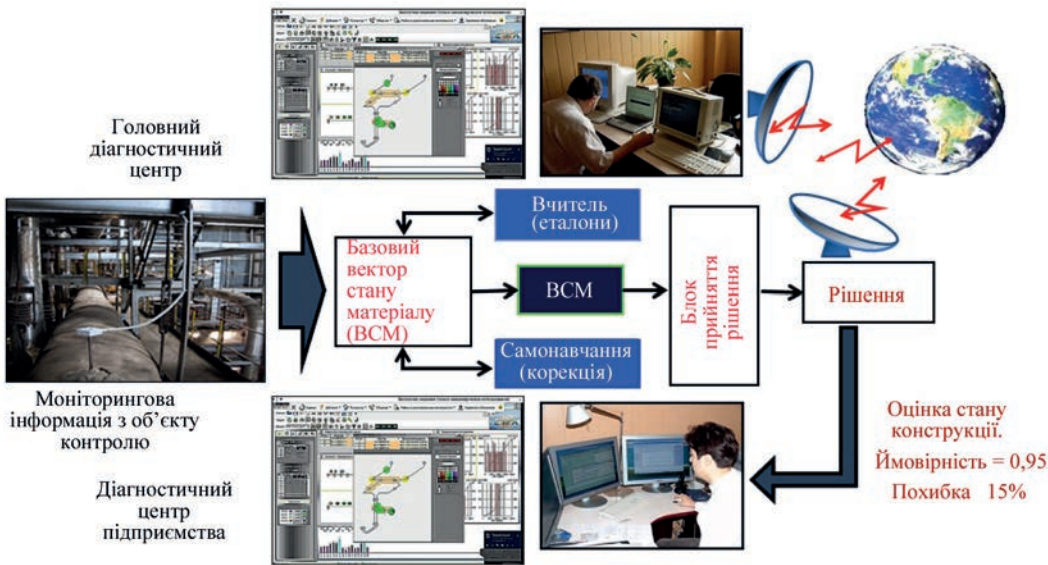


Рис. 4. Система управління безпекою експлуатації трубопроводу гарячого промперегріву пари типової теплоелектростанції



Рис. 5. Стан АЕ активності двох ниток трубопроводу в робочому стані через 13 год. 13 хв. (антенна 1) і 6 год. 22 хв. (антенна 2) з моменту початку контролю. У верхній частині екранів представлені індикатори небезпеки у вигляді таблиці прогнозованого граничного навантаження. Кольором відображено ступінь небезпеки. Індикатор пошкодженості не показаний

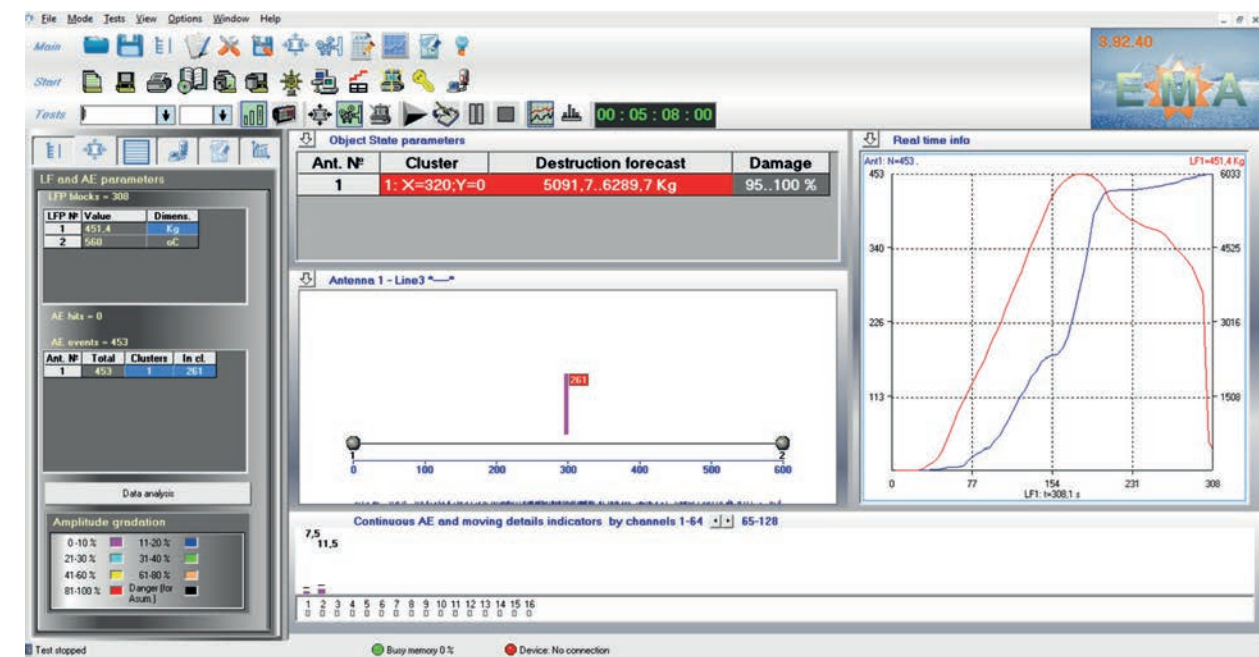


Рис. 6. Вікно програми ЕМА з результатами випробування зразка зі сталі 15Х1МФ при температурі 560 °С

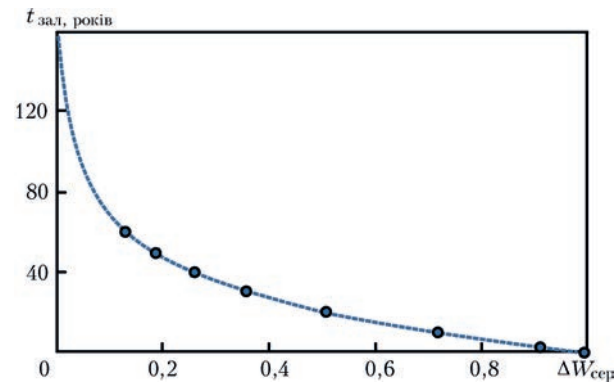


Рис. 7. Номограма для визначення залишкового ресурсу за відомою пошкодженістю

рис. 8. Вгорі розташовані дані по розрахунковому ресурсу і графіки його зміни для кожного зі сховищ, внизу – розгортка поверхні із зазначенням рівня наливу і ділянок акустичної активності. У самому низу стовпчиками позначені значення неперервної АЕ по кожному з вимірювальних каналів. Така програма-інтегратор дозволяє кваліфікованим фахівцям відразу на одному екрані отримувати повну інформацію про стан чотирьох резервуарів, контрольованих у режимі постійного моніторингу.

Резюмуючи представлені результати, слід підкреслити, що метод АЕ у поєднанні з кіне-

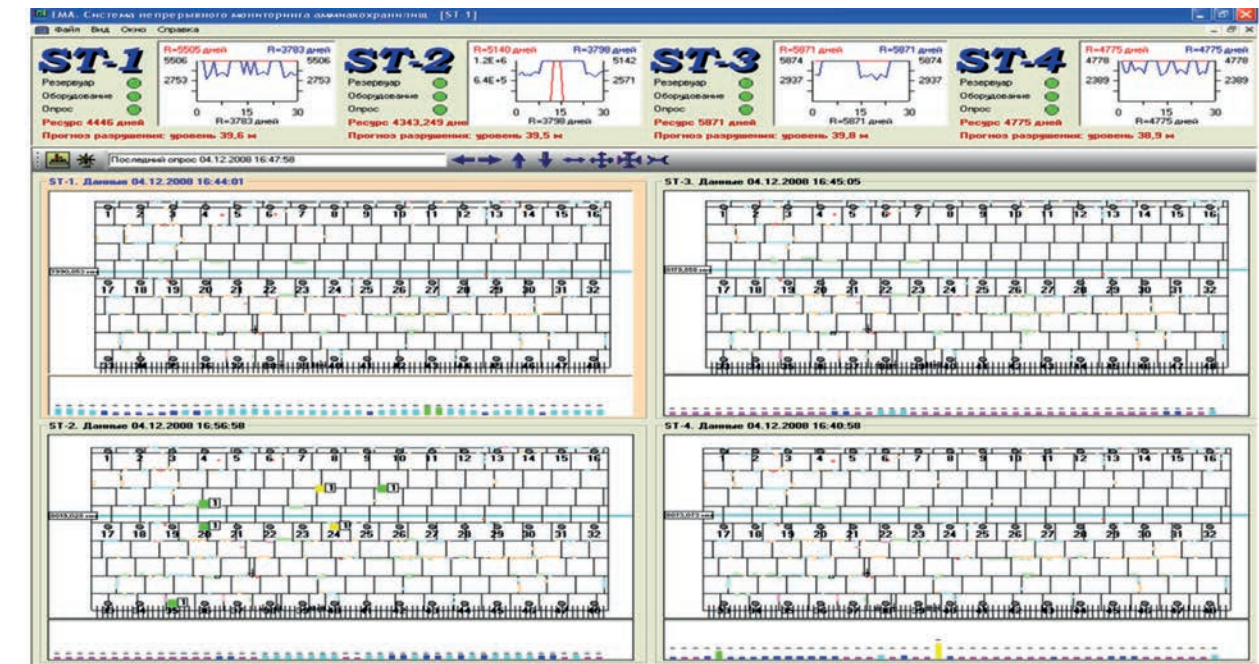


Рис. 8. Вікно програми-інтегратора для сховищ рідкого аміаку ОПЗ з результатами розрахунку залишкового ресурсу

тичним підходом до оцінки накопичення пошкоджень і розвитку руйнування доповнений алгоритмами розпізнавання образів, дає незаперечні переваги перед іншими неруйнівними методами контролю стану матеріалів. Отримуючи в реальному часі акустичний паспорт матеріалу, АЕ дозволяє прогнозувати руйнівне навантаження і залишковий ресурс конструкцій в процесі експлуатації, навіть якщо невідомі матеріал, з якого конструкція виготовлена, його механічні та фізико-хімічні властивості і час експлуатаційного напруження. З цієї точки зору метод АЕ видається оптимальним в якості основи для SHM технології, особливо при безперервному моніторингу діючих конструкцій.

На закінчення відзначимо, що ще задовго до виникнення в останні кілька років терміну SHM, а саме з 2001 р., системи безперервного АЕ моніторингу з можливостями оцінки стану матеріалу, розроблені за участю ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, впроваджені в Україні в хімічній і енергетичній галузях [8, 9] і продовжують успішно функціонувати на протязі багатьох років, що говорить про наявність безперечного пріоритету України у розвитку даної технології.

Висновки

Запропонована гіпотеза щодо акустичного відображення фізичних властивостей матеріалів, що змінюються в процесі експлуатації.

Гіпотеза може бути сформульована як «акустичний паспорт матеріалів».

Отримані раніше експериментальні дані на різних матеріалах, в першому наближенні, підтверджують запропоновану гіпотезу.

Висунута гіпотеза дозволяє за однаковим алгоритмом оцінювати стан різних матеріалів, а саме прогнозувати руйнівне навантаження і, відповідно, пошкодженість, без необхідності попереднього знання поточних фізико-механічних властивостей матеріалу, оскільки АЕ автоматично адаптується до змін, викликаних пошкодженням матеріалу, незалежно від його типу.

Запропоновано метод для визначення за даними АЕ критичної пошкодженості матеріалу і використання значень критичної пошкодженості для оцінки залишкового ресурсу.

Гіпотеза щодо АЕ як акустичного паспорту матеріалу, запропоновані в її рамках методи визначення пошкодженості і залишкового ресурсу використані при АЕ контролі зразків і конструкцій зі сталей та композитних матеріалів.

Список літератури

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: монография. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.

2. Недосека С.А. (1994) *Исследование кинетики разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев.
3. Чаусов Н.Г. (1992) *Кинетика разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования*: автореф. дис. ... д-р техн. наук. Киев.
4. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашова Л.И. и др. (2018) Исследование методом акустической эмиссии кинетики накопления повреждений при разрушении материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 3–13.
5. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашова Л.И. и др. (2017) О накоплении повреждений в материалах. *Там же*, **3**, 3–13.
6. Nedoseka, S., Nedoseka, A., Shevtsova, M. (2019) Acoustic Emission Testing of Composite Materials Including Specimens Simulating the Embedded Sensors. *Civil Eng Res J*. 2019; 9(1): 555754. DOI: 10.19080/CERJ.2019.09.555754.
7. Васильев О.С., Грузд А.А., Йолкін А.О. та ін. (2012) 10-річний досвід впровадження безперервного акустико-емісійного моніторингу сховищ аміаку Одеського припортового заводу. *Хімічна промисловість України*, **3**, 43–52.
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2018) On the application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *International Journal of Condition Monitoring*, **8**.
9. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 9–16.
10. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Там же*, **3**, 16–22.

References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) Fundamentals of design and diagnostics of welded structures: Monography. 5th Ed. by B.E.Paton. Kiev, Indprom [in Russian].
2. Nedoseka, S.A. (1994) Investigation of the kinetics of metal fracture at final stages of deformation by acoustic emission method. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
3. Chaushov, N.G. (1992) Kinetics of metal fracture at final stages of deformation. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
4. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I. et al. (2018) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of damage accumulation at fracture of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 3-13 [in Ukrainian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I. et al. (2017) Accumulation of damages in materials during fracture. *Ibid.*, **3**, 3-13 [in Ukrainian].
6. Nedoseka, S., Nedoseka, A., Shevtsova, M. (2019) Acoustic emission testing of composite materials including specimens simulating the embedded sensors. *Civil Eng. Res. J.*, 9(1):55754. DOI: 10.19080/CERJ.2019.09.555754.
7. Vasiliev, O.S., Gruzd, A.A., Jolkin, A.O. et al. (2012) Ten year experience of introduction of continuous acoustic emission monitoring in ammonia storage facilities at Odessa Port Plant. *Khimichna Promyslovisht Ukrainy*, **3**, 43-52 [in Ukrainian].
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2018) On the application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *Int. J. of Condition Monitoring*, **8**.
9. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 9-16 [in Russian].
10. Nedoseka, A.Ya. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Ibid.*, **3**, 16-22 [in Russian].

FEATURES OF ACOUSTIC EMISSION AT EVALUATION OF THE STATE OF MATERIALS

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, O.I. Boichuk, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko

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

Conducted investigations were the base to formulate a hypothesis, which shows that acoustic emission is a mirror reflection, and, therefore, an acoustic certificate of material characteristics that change in operation, and, in particular, of their mechanical properties. Use of this hypothesis was verified in practice and allows prediction of breaking loading of the material without interrupting the object service and without the need to have prior knowledge of initial values of mechanical properties of the materials. In keeping with the presented hypothesis, AE reflects not the properties of the material proper, but their change, and it automatically adapts to such changes, irrespective of material type. Experiments, conducted with numerous materials, differing by their physical characteristics, including steels of different classes, aluminium alloys, concretes and composites, showed that limit breaking load of these materials by AE data is determined by the same algorithm with an error related just to the technical features of the measurement instruments. Accumulated experience allowed moving over to creation of an intelligent technology for assessment of structure material state in operation, and of AE systems based on it. Such systems have already become widely used at continuous monitoring of the state of the structure in production environment. 10 Ref., 8 Fig.

Keywords: acoustic emission, prediction of breaking load; physical characteristics of materials, vector of material state; damage, resource

Надійшла до редакції 25.01.2020

Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд

(цільова комплексна програма наукових досліджень НАН України)

На виконання постанови Президії НАН України від 16.12.2015 № 293 «Про виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс») в 2016 – 2020 рр. науковими установами НАН України було проведено дослідження за наступними темами:

- розробка методологічних основ оцінки і подовження ресурсу конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки та авіакосмічної техніки;
- розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації;
- розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації;
- розробка ефективних методів оцінки та подовження ресурсу об'єктів атомної енергетики;
- підвищення надійності та продовження ресурсу енергетичного обладнання і систем;
- створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості;
- підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій;
- розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою подовження терміну їх експлуатації;
- матеріали з подовженим ресурсом роботи для екстремальних умов експлуатації.

Мета програми – розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації технічно та екологічно небезпечних об'єктів.

За результатами програми буде видано збірку «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», яку можна замовити в редакції журналу.

Архів збірок за програмою «Ресурс» за 2006, 2009, 2012, 2015 рр. на сайті <https://patonpublishinghouse.com/ukr/compilations#close>.

