

# МЕТОД АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ОЦІНЮВАННІ СТАНУ ЗВАРНИХ ШВІВ ТА ЇХ СЛУЖБОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

## Частина 2. Практичне застосування

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

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [inpat59@paton.kiev.ua](mailto:inpat59@paton.kiev.ua)

Більшість існуючих конструкцій містить зварні з'єднання. Розглядаються питання контролю службових характеристик зварних з'єднань з використанням методу акустичної емісії. Увага приділена зміні властивостей матеріалів діючих конструкцій, що мають зварні елементи, після тривалої експлуатації з урахуванням часу та ймовірного порушення експлуатаційних умов. Розглянуті приклади оцінки зміни характеристик матеріалів зварних конструкцій за даними акустичної емісії, визначення їх пошкодженості та залишкового ресурсу. Бібліогр. 17, табл. 5, рис. 24.

*Ключові слова:* зварні шви, службові властивості, акустична емісія (АЕ), АЕ активність, АЕ сканування, пошкодження, руйнування

Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію (АЕ) і можливість кількісної оцінки такого впливу методом АЕ розглянуто в частині 1 даної статті [1].

Висока чутливість методу АЕ до виникнення та розвитку дефектів у матеріалах на дуже ранніх стадіях руйнування дозволяє контролювати службові властивості зварних з'єднань як безпосередньо в процесі зварювання, так і на будь-яких етапах експлуатації зварних конструкцій [2].

У частині 2 розглядаються питання практичного застосування методу АЕ для контролю процесу зварювання та оцінки службових властивостей зварних з'єднань різних типів на прикладі деяких конструкцій з тривалим експлуатаційним напруженням. Відзначимо, що несуча здатність конструкції і, відповідно, її ресурс значною мірою закладаються на стадії виготовлення. Коригування вказаних чинників відбувається під час регламентних або позапланових ремонтних заходів. Оскільки більшість металевих конструкцій є зварними,

їх якість суттєво залежить від стану зварних швів, зокрема тих, що виконують під час ремонту. Як приклад неякісно виконаного зварного шва можна привести руйнування у трубі газопроводу уздовж лінії неповного проплавлення, що виникли за рахунок зсуву дуги під час зварювання (рис. 1).

Важливою з точки зору запобігання ситуаціям, подібним представленим на рис. 1, є можливість контролювати за допомогою методу АЕ якість зварного шва безпосередньо в процесі зварювання. Такі експерименти проводилися у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ і показали, що метод АЕ в процесі зварювання дозволяє відбракувати неякісні ділянки зварних швів на сталевих зразках.

З метою показати можливість застосування методу АЕ для контролю виникнення дефектів під час зварювання алюмінієвих сплавів проведемо дослідження сплаву АМг5В. Зварювали пластину товщиною 10 мм, шов 600×12 мм. Для зварювання використовували пристрій АДСВ-2 (рис. 2, а). Зварювання виконували вольфрамовим електро-

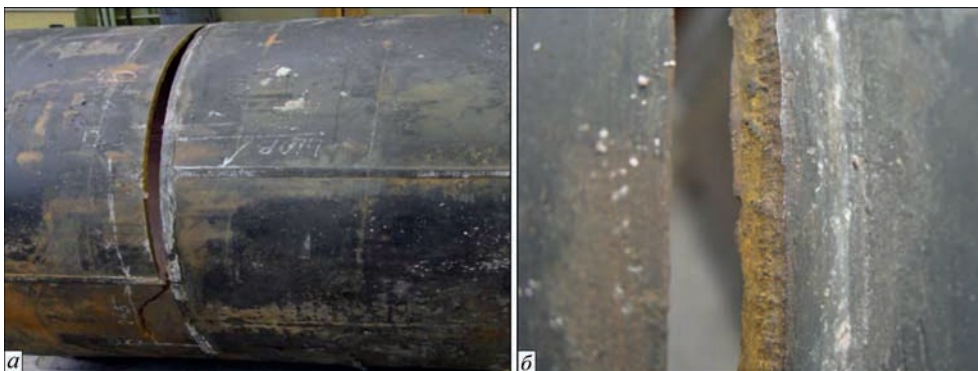


Рис. 1. Труба газопроводу після руйнування (а) та збільшене зображення ділянки, на якій видно результат неповного проплавлення металу (б)

Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Бойчук О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>

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

дом з присадкою дротом діаметром 2 мм зі сплаву АМгб. Параметри зварювання: напруга  $U = 16$  В, струм  $I = 350$  А, швидкість руху дуги 15 м/год. Для реєстрації АЕ використовували систему ЕМА-1 на базі вимірювального пристрою «Defectophone» та два датчики типу ДАЕ-01, розташовані на кінцях зони зварювання, що дозволило отримувати координати та амплітуди подій АЕ, які виникали в процесі зварювання. Картина розподілу подій АЕ та їх амплітуд представлена на рис. 2, б. За даними досліджень, проведених після зварювання, якість шва була задовільною, недопустимих для умов експлуатації дефектів не виявлено. В той же час (рис. 2, б) при проведенні випробувань зареєстровано значну кількість подій АЕ з високими амплітудами. Відповідно слід вважати, що система АЕ зареєструвала незначні пошкодження типу дислокаційних зсувів або їм подібних. Це означає, що більш значні дефекти також можуть бути зафіксовані, але потрібні розробка і застосування фільтрів для відбраковування отриманих сигналів АЕ за певними критеріями, виділяючи з них події, що відповідають наявності дійсно небезпечних дефектів. Це вимагає додаткових досліджень.

Для вирішення поставлених завдань для сталей проведено зварювання трьох зразків з матеріалу 09Г2С та двох – з 13ХГМРБ (матеріал, схильний до дефектоутворення). Товщина зразків 20 мм. Попередньо визначені та підготовлені місця установки датчиків АЕ, забезпечений їх захист під час зварювання. Для проведення контролю використовували систему ЕМА-2, для обробки да-

них – програмне забезпечення (ПЗ) ЕМА-3.92 [3]. Перед проведенням АЕ контролю було зроблено попереднє тестове прозвучування для визначення вихідних даних, необхідних для роботи системи ЕМА-2: фіксований поріг – 10 мВ; плаваючий поріг –  $2\sigma$ ; мертвий час вимірювання – 10 мс; частота зрізу фільтра високої частоти – 100 кГц. АЕ контроль проводився як безпосередньо в процесі зварювання з метою оцінки рівнів АЕ, урахування впливу технологічних перешкод, оцінки впливу багатопрхідного та неякісного зварювання на загальну картину АЕ, так і при охолодженні зварного шва.

При проведенні АЕ контролю реєструють дискретну та неперервну АЕ. Дискретна АЕ характеризує розвиток тріщин, перехід конструкційного матеріалу в пластичний стан, розкриття окисних плівок і т.п. Механізмом генерації дискретної АЕ є зародження в структурі матеріалу пошкоджень та їх дискретний розвиток. Неперервна АЕ характеризує витікання рідини або газу крізь нещільності в матеріалі або інтенсивне переміщення груп дислокацій. Механізмами генерації неперервної АЕ є процеси безперервної локальної перебудови структури матеріалів при їх деформації або просочування і витікання рідин і газів через нещільності та тріщини.

З метою визначення координат джерел АЕ використовували 2 датчики (канали №№ 3, 5 для сталі 09Г2С та №№ 1, 2 – для 13ХГМРБ). Застосовували кластерну локацію. Розмір кластера для реєстрації зон підвищеної АЕ активності в процесі зварювання визначали як 10 % від розміру бази антени, яка становила 100...420 мм. Кластеризація зареєстрованих подій від гострої нещільності, такої як тріщина, є щільною, в той час як райони пластичної деформації, пов'язані, наприклад, з корозійними пошкодженнями, формують область джерела з великим ступенем невизначеності в розмірах. У більшості випадків зростаюча тріщина розглядається як найбільш небезпечний дефект. Джерела, які розглядаються як малоактив-

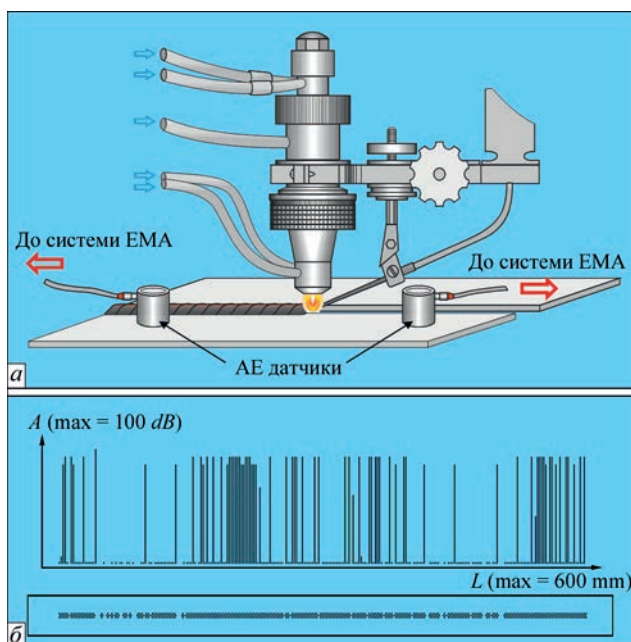


Рис. 2. Дослідження сплаву АМг5В: а – схема зварювання пластини; б – гістограма амплітуд  $A$  подій АЕ уздовж зварного шва відповідно до координати  $L$  (зверху) та координати цих подій АЕ (внизу)

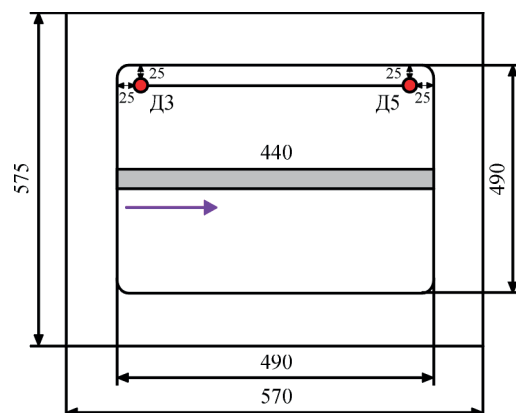


Рис. 3. Типова схема контролю зварювання сталевих пластин

ні або мало інтенсивні, зазвичай не вимагають подальшої оцінки.

Загальна схема випробування наведена на рис. 3 (інші схеми відрізняються лише шириною пластины та відстанню між датчиками АЕ).

Зупинимося на найбільш показових результатах досліджень. Головний та самий принциповий результат: у процесі зварювання незалежно від кількості проходів та якості шва отримується чітка картина АЕ, а зареєстровані події слідує за зварюванням. Параметри та картину АЕ під час п'ятипрохідного зварювання (жорсткий стик) наведено у табл. 1 та на рис. 4. Результати рентгенографічного дослідження, проведеного після охолодження шва, показують, що зварювання виконане з задовільною якістю (рис. 5).

На рис. 4 показані фрагменти екранів локації програми ЕМА-3, де у нижній частині – локаційна схема з номерами датчиків, а під нею – координати зареєстрованих подій АЕ (вертикальні риси, висота яких відповідає амплітуді події 0...500 мВ). Над локаційною схемою стовпчиками з прапорцями показані сформовані на основі подій АЕ кластери (колір відповідає певному діапазону амплітуд подій АЕ, прапорець показує кількість подій АЕ у відповідному кластері). Даний опис відноситься і до рис. 7, 21, 23.

Картина АЕ під час першого та п'ятого проходів зварювання (рис. 4) відрізняється неістотно як за кількістю подій АЕ, так і за їх розташуванням (під час інших трьох картина була в значній мірі ідентичною). Сформовані кластери мають

Таблиця 1. Параметри зварювання пластин зі сталі 09Г2С

Номер проходу	Параметри зварювання		
	$I, A$	$U, B$	$V_{зв}, м/год$
1	220...230	36...37	16...17
2	250	35...36	20
3	250	35	20
4	250	35	16...17
5	250	35	19...20

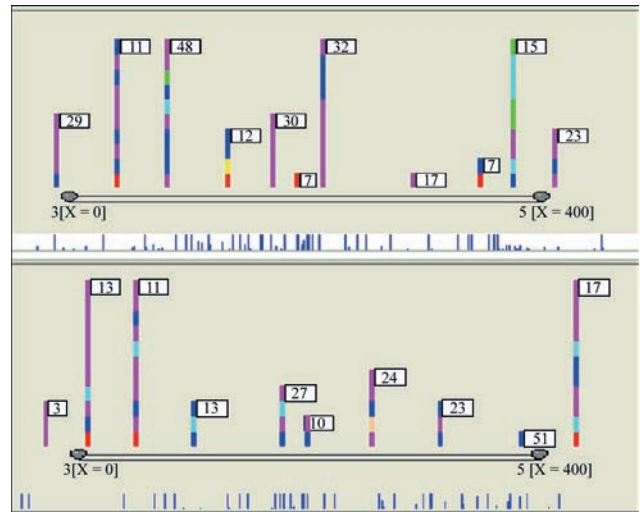


Рис. 4. Знімки екрану локації системи ЕМА. Перший (зверху) та останній (внизу) етапи зварювання пластины згідно з табл. 1

стохастичний характер розташування відповідно до стохастичного характеру виникнення сигналів АЕ під час зварювання та не несуть самі по собі суттєвої інформації про якість зварного з'єднання. Але на їх базі принципово можуть бути створені еталони якісного процесу зварювання.

Наступним важливим результатом є те, що по мірі охолодження зразка після зварювання кількість зареєстрованих подій АЕ поступово знижується і досягає нульової позначки ще до повного охолодження шва. Час зникання АЕ інформації після завершення зварювального процесу може бути використаний як критерій його якості. Наприклад, у наведеному вище експерименті, де якість шва достатньо висока, спостерігалось швидке зниження кількості подій АЕ по мірі охолодження, а при зниженні температури шва до 48 °С – їх повна відсутність у подальшому.

Зовсім по-іншому можна охарактеризувати поведінку матеріалу 13ХГМРБ. У процесі зварювання електродом АНП-2 ( $d = 4,0$  мм) спостерігалась АЕ активність, подібна до тої, що і в сталі 09Г2С, але в матеріалі виникла тріщина довжиною близько 100 мм (рис. 6). Наслідком цього стало те, що на другий день після зварювання були зареєстровані події АЕ в області трі-

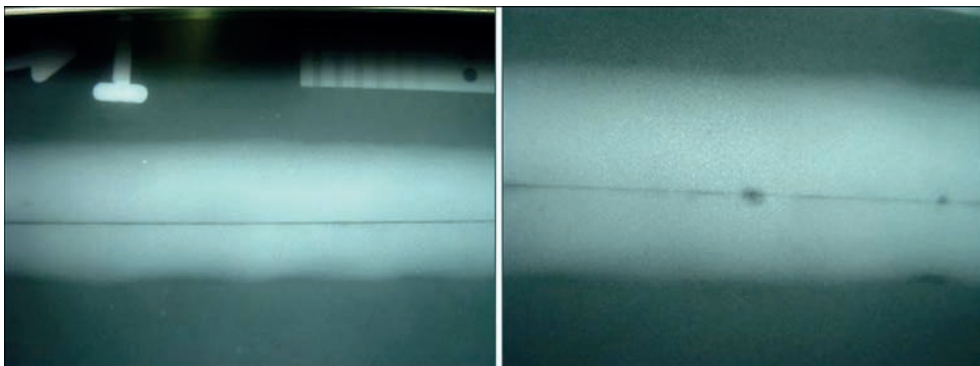


Рис. 5. Рентгенографія окремих ділянок зварного шва після п'яти проходів зварювання

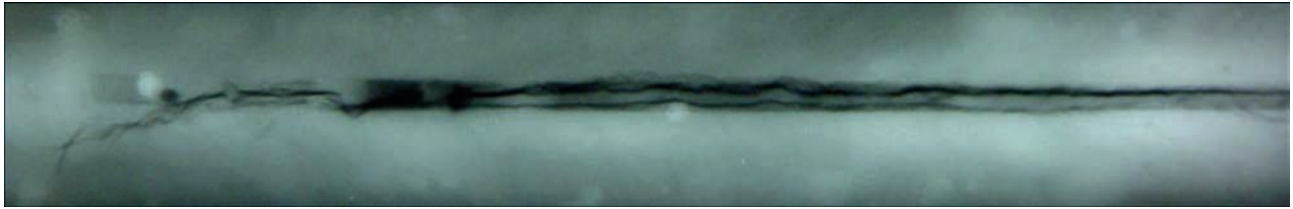


Рис. 6. Рентгенографія тріщини в матеріалі 13ХГМРБ після зварювання

щини (рис. 7). Датчики 1 та 2 при цьому були розташовані близько до країв тріщини.

Незважаючи на незначну акустичну активність, сама її наявність після повного охолодження зразка показує, що метод АЕ є чутливим до дефектів, розвиток яких не повністю загальмувався після закінчення зварювального процесу та наступного повного охолодження зразка до кімнатної температури.

Таким чином, одним з показників якості зварного шва є відсутність АЕ після повного охолодження шва, а час зникнення АЕ після охолодження може слугувати кількісним показником якості зварювання (звучання матеріалу може продовжуватися і після остигання, час звучання залежить від матеріалу).

Оскільки обсяг даної серії експериментів щодо контролю процесу зварювання методом АЕ був досить обмеженим, слід було б рекомендувати продовжити такі дослідження, тому що при досягненні результатів, що могли б використовуватися на виробництві, це б дозволило суттєво покращити контроль зварної продукції безпосередньо під час її виготовлення. Відзначимо також, що за останній час подібні дослідження активізувалися за кордоном [4–6, 12–13].

Розглянемо можливість АЕ контролю великогабаритних конструкцій невеликою кількістю датчиків АЕ. Як правило, такі конструкції містять значну кількість зварних швів. Особливістю вітчизняних конструкцій є те, що багато з них відпрацювали плановий ресурс, але за економічними чинниками не можуть бути замінені повністю або навіть частково. Єдиним засобом продовження їх безпечної експлуатації є періодичний контроль або постійний моніторинг. При цьому іншого неруйнівного методу, крім АЕ, який дозволяв би невеликою кількістю датчиків здійснювати стовідсотковий контроль стану таких конструкцій, не існує. Водночас, результати контролю, отримані



Рис. 7. Знімок екрану локації системи ЕМА (дані на наступний день після зварювання (13ХГМРБ))

методом АЕ, можуть бути ефективно перевірені іншими методами завдяки тому, що використання АЕ дозволяє з досить великою точністю локалізувати небезпечні ділянки, і вже на них має виконуватися перевірка отриманих даних додатковими методами. Це суттєво прискорює процес оцінки стану конструкцій, що контролюються, і водночас дозволяє пересвідчитись у достовірності результатів АЕ контролю.

Одним з таких показових випробувань було тестування методом АЕ змійовика печі П-101 загальною довжиною близько 1200 м, що складається з чотирьох потоків, які мають відповідно радіаційні та конвекційні ділянки кожний. Змійовик являє собою трубу діаметром 219 мм та товщиною 10 мм і є об'єктом підвищеної небезпеки, оскільки температура стінки труби може досягати 523 °С, робочий тиск – 60 ат, а робочим середовищем є вибухонебезпечний вакуумний дистилат. Загальна кількість зварних швів близько 500. Відзначимо, що повний контроль усієї поверхні змійовика іншими неруйнівними методами контролю потребував би у сотні разів більшого часу і складних підготовчих робіт. У даному ж випадку для проведення контролю необхідно було зачистити та знежирити чотири ділянки діаметром 13 мм, щоб встановити на них датчики (рис. 8) та зафіксувати їх спеціальною контактною акустопрозорою речовиною. Попередня перевірка показала незначне затухання АЕ сигналів у матеріалі (сталь 12Х18Н10Т), у зв'язку з чим вдалося провести повний контроль змійовика всього за 2 етапи – по 600 м за кожний. Це свідчить про суттєву перевагу методу АЕ у сенсі витрати часу та зусиль на підготовку вимірювального обладнання порівняно з іншими неруйнівними методами,

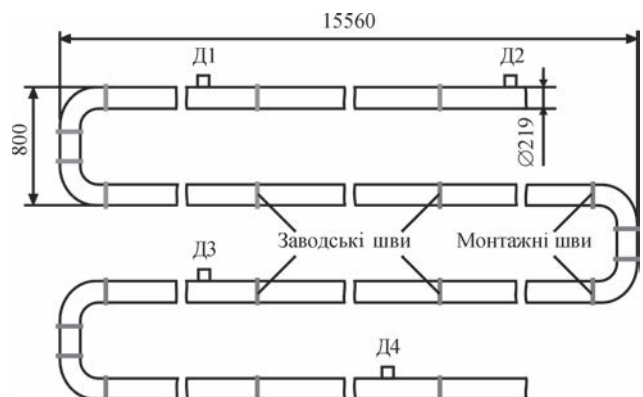


Рис. 8. Схема розташування зварних швів та датчиків АЕ (Д1...Д4) під час контролю змійовика

Таблиця 2. Результати АЕ контролю першого потоку, підтверджені кольоровою дефектоскопією та рентгенографією

Ділянка	Тріщина		Пора		Підріз	
	Кількість	Макс. довжина/глибина, мм	Кількість	Макс. діаметр, мм	Кількість	Макс. довжина, мм
Радіація	2	4/2	2	2	1	300
	1	60/3	2	2	3	200
	3	8/3	3	3	2	200
	2	5/2	-	-	1	100
	2	6/3	-	-	-	-
	2	8/3	-	-	-	-
Конвекція	2	6/2	3	2	-	-
	4	8/2	-	-	-	-
Перехід	-	-	2	3	1	60

а також про принципову можливість проведення стовідсоткового контролю стану об'єкту невеликою кількістю датчиків без необхідності їх пересування під час контролю в інші місця.

Навантаження виконували за стандартною для АЕ випробувань схемою – підйом тиску на 20 ат з наступною витримкою протягом 10 хв, потім знову підйом тиску та витримка, і так кілька разів до максимального випробувального тиску 60 ат. Процедура контролю при цьому зайняла близько 100 хв.

Оскільки результати проведеного контролю змійовика вже були опубліковані [7], сконцентруємося на отриманих висновках. Вони є важливими, тому що після АЕ контролю вказані методом АЕ небезпечні місця були перевірені незалежними фахівцями з використанням двох неруйнівних методів – кольорової дефектоскопії та рентгенографії, застосування яких для перевірки даних АЕ контролю може бути ефективно використано [8]. Це дозволило підтвердити високу достовірність даних, отриманих методом АЕ, а також визначити, які саме дефекти були причиною виникнення АЕ подій. Для більшої наочності наведемо у табл. 2 лише дані, отримані для першого потоку.

Як бачимо, більшість знайдених у зварних швах дефектів становлять тріщини, далі йдуть пори, і найменше знайдено підрізів. Ця статистика, типова для усіх чотирьох потоків, дозволяє зробити висновок, що метод АЕ успішно можна використовувати для контролю службових властивостей зварних конструкцій великих габаритів і при цьому потенційно небезпечних для навколишнього середовища. Це найбільш важли-

вий висновок, але отримані дані дають, крім цього, можливість оцінити, наскільки корисним був би безперервний АЕ моніторинг даного об'єкту. У табл. 2 показано, що труба продовжувала працювати з тріщиною в зварному шві, яка мала довжину 60 мм та глибину 3 мм – майже третину від товщини труби. Ймовірно причиною того, що труба не зруйнувалася, може бути статична невизначеність у місці, близькому до даного шва. Конструкції з такою особливістю можуть роками працювати за наявності досить великих тріщин (наприклад, мостові, фермові та кранові). Результати металографічного дослідження типових дефектів у зварних швах надані на рис. 9.

Виникає питання: як визначити, що тріщина на даному етапі експлуатації несе загрозу для конструкції? Є велика кількість розрахункових методів, у тому числі побудованих на базі механіки руйнування. При правильній постановці задачі і вирішенні її грамотним фахівцем може бути отриманий досить достовірний результат. Але розрахунки потребують часу, якого під час реальної експлуатації конструкції може не вистачити, оскільки руйнування може статися раніше. Альтернативою розрахункам є безперервний АЕ моніторинг з використанням нормованих та сертифікованих засобів оцінки безпеки та прогнозування руйнівного навантаження. При використанні постійного моніторингу будь-який розвиток небезпечного для конструкції дефекту буде заздалегідь зафіксований, після чого у реальному часі системою моніторингу буде видано кольоровий та звуковий сигнал про небезпеку, а на екрані

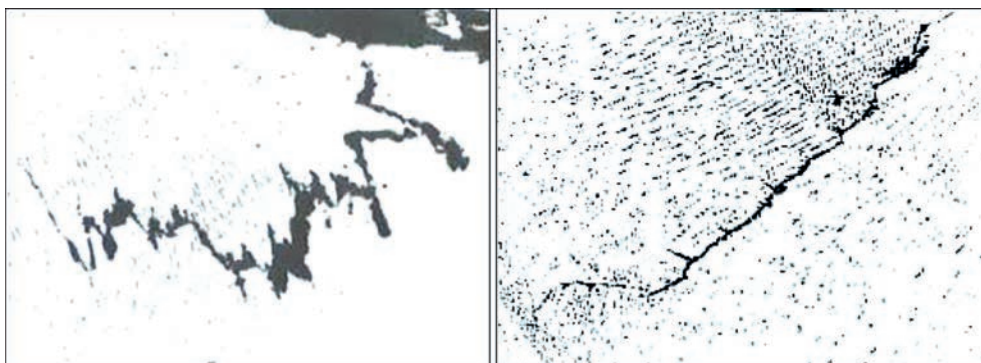


Рис. 9. Типові тріщини у змійовику печі П-101, ×120

Таблиця 3. Рекомендована кількість ділянок ремонту змійовика печі П-101 за результатами АЕ контролю

Ділянка	1 потік	2 потік	3 потік	4 потік
Радіація	12	19	8	12
Конвекція	9	-	-	9
Перехід	5	13	15	-
Загалом	26	32	23	21

відображені кількісні показники прогнозу руйнівного навантаження (рис. 14 [1]). Це є швидким та безпечним засобом запобігання аваріям.

У даному випадку відповідну небезпечну тріщину було зареєстровано методом АЕ як дефект, що розвивається. Стрімкість розвитку показала необхідність ремонту даної небезпечної ділянки. При цьому для методу АЕ неважливо, які габарити та розташування має небезпечний дефект. Значення має лише його акустична активність. А використання додаткових методів контролю показало, що дефект справді присутній, та дозволило встановити його розміри.

За результатами АЕ контролю змійовика печі П-101 був рекомендований ремонт певної кількості зварних швів (табл. 3).

Загальна кількість відбракованих зварних швів складає 102. Враховуючи, що загальна кількість швів сягає близько 500, приблизно оцінимо інтегральну пошкодженість об'єкту контролю в цілому, використовуючи в якості параметра пошкодженості відношення числа дефектних швів до їх загальної кількості [9, 11] згідно з формулою:

$$\Delta W_{\text{ср}} = (1 - N_{\text{пошк}} / N_{\text{заг}}) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

де  $\Delta W_{\text{ср}}$  – інтегральна пошкодженість об'єкта контролю;  $N_{\text{заг}}$  – загальна кількість зварних швів;  $N_{\text{пошк}}$  – кількість пошкоджених швів, і отримаємо  $\Delta W_{\text{ср}} \approx 20 \%$ .

Цікаво виконати перевірку залежності пошкодженості від експлуатаційного напруження, враховуючи, що на момент контролю змійовик мав строк напруження 15 років. Авторами на великому обсязі труб магістральних газопроводів і з використанням п'яти незалежних методів було отримано узагальнену формулу для середньоарифметичного значення пошкодженості  $\Delta W_{\text{ср}}$ , яка може бути описана [9] як

$$\Delta W_{\text{ср}} = a e^{bt} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

де  $t$  – термін експлуатаційного напруження;  $a = 0,1352$ ;  $b = 0,0333$  [9].

Таким чином, для даного об'єкта контролю  $\Delta W_{\text{ср}} = 0,1352 \exp(0,0333 \cdot 15) \cdot 100 \% \approx 22 \%$ . Як бачимо, похибка між розрахунковими за результатами контролю даними пошкодженості 20 % та їх перевіркою за формулою (2) є несуттєвою. Формула застосовується тільки для матеріалів, що були в експлуатації. Це означає, що узагальнена формула пошкодженості (1) є справедливою не тільки для труб магістральних трубопроводів, які експлуатуються при зовсім інших умовах навантаження та середовища, а й для проконтрольовано-

го змійовика печі. Відповідно справедливим буде і оснований на формулі (2) розрахунок залишкового ресурсу об'єкта на момент контролю. Для цього можна скористатися номограмою (рис. 10), що пов'язує залишковий ресурс з пошкодженістю [9–11]. Відмінність полягає в тому, що на діаграмі пошкодженість виражена не у відсотках, а у долях одиниці, та максимальній пошкодженості 100 % на номограмі відповідає  $\Delta W_{\text{ср}} = 1$ .

Можна визначити, що при пошкодженості 20 % (або 0,2 на номограмі) інтегральний залишковий ресурс змійовика на момент контролю склав  $\approx 47$  років.

Таким чином, за результатами АЕ контролю подібних об'єктів можна визначити небезпечні ділянки, що потребують ремонту, які включають тріщини, пори та підрізи різних розмірів та розташування. На базі оцінки отриманих даних є можливість оцінити інтегральну пошкодженість об'єктів контролю та їх залишковий ресурс.

Відзначимо, що незважаючи на активізацію подібних досліджень за кордоном [4–6, 12–16], їх основним недоліком є відсутність чітко нормованої кількісної оцінки пошкодженості, прогнозу руйнування та ймовірності. При цьому спиратися при оцінці стану як основного матеріалу, так і матеріалу зварних з'єднань на табличні дані небезпечно, оскільки навіть сусідні ділянки однієї конструкції можуть мати різні фізико-механічні характеристики, різну пошкодженість і відповідно різний рівень небезпеки. Слід відзначити досить перспективний вітчизняний підхід, який теж базується на даних АЕ контролю [17].

Проведені відділом технічної діагностики зварних конструкцій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України масштабні випробування зразків матеріалів трубопроводів з різних регіонів України з різним ек-

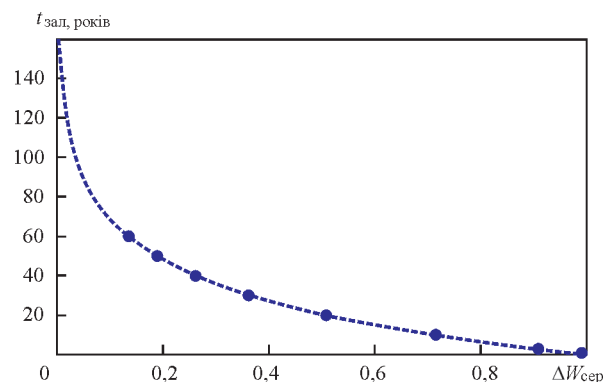


Рис. 10. Номограма для визначення залишкового ресурсу за відомою пошкодженістю

сплуатаційним напрацюванням показали істотну різноманітність АЕ, в тому числі відмінності у наступних параметрах:

- час виникнення першої АЕ події (від 1 с до 2 хв з моменту початку випробування);
- навантаження, при якому з’являється дискретна АЕ (2...55 % по відношенню до руйнівного);
- рівень неперервної АЕ (10...500 мВ);
- коливання рівня неперервної АЕ (2...1000 %);
- загальна кількість подій АЕ (7...12000);
- амплітуди АЕ на однакових стадіях деформування (1...500 мВ);
- активність АЕ на однакових стадіях деформування (1...100 с<sup>-1</sup>);
- зміна числа подій АЕ в матеріалах з накопиченими пошкодженнями (від зменшення в 2...10 разів до такого ж збільшення).

Перераховане вище дозволяє стверджувати, що загальної картини АЕ для досліджених матеріалів не спостерігається. Проте результати проведених випробувань можна умовно розбити на 2 основні групи [9]. Перша група, що рідше зустрічається, характеризується зниженням числа подій АЕ в матеріалі з багаторічним напрацюванням. Друга, найбільш характерна, – істотним зростанням числа подій. Для матеріалів другої групи характерний також більш низький загальний рівень амплітуд АЕ. Додаткові металографічні дослідження підтвердили припущення про те, що для першої групи основною зміною, пов’язаною з напрацюванням, є окрихчування, яке призводить до зниження числа подій АЕ. Для другої групи, навпаки, збільшення числа подій АЕ говорить про накопичення великої кількості розсіяних пошкоджень, що підтверджується додатковими експериментами чотирма різними методами та служить основою при побудові моделі АЕ в пластичних матеріалах, руйнування в яких розвивається за механізмом виникнення, зростання та з’єднання великого числа пор. Така різноманітність призводить до того, що в критерій (1) в залежності від отриманих АЕ даних закладаються різні параметри з метою розрахунку пошкоженості та залишкового ресурсу. Якщо ж кількість подій АЕ після тривалого напрацювання майже не змінюється, можна припустити, що реалізується змішаний механізм накопичення пошкоджень – окрихчування одночасно з розвитком пор. Водночас слід відзначити, що алгоритми прогнозу руйнівного навантаження, закладені у ПЗ систем типу ЕМА, працюють однаково надійно незалежно від вказаної різноманітності механізмів руйнування.

Покажемо на прикладі труби з магістрального трубопроводу, що зазнав перед цим аварію, ефективність оцінки стану матеріалу з використанням прогнозу руйнування та порівняємо результати

оцінки з даними, отриманими іншими методами. Матеріал для досліджень був наданий з ділянки, розташованої біля місця руйнування (фрагмент труби з найближчим до ділянки руйнування зварним швом). Згідно з паспортом, труба виготовлена зі сталі 20, має діаметр 500 мм та товщину стінки 8 мм. На рис. 11–13 показані схеми виготовлення зразків різного типу для комплексного дослідження властивостей отриманого фрагменту труби. Відзначимо, що на рис. 11 зварний шов і зразки у правій частині показані умовно для більшої наочності. У реальності зразки типу АЕ-01Р вирізали з тієї ж частини труби, що й інші, з ділянки, розташованої зліва, таким чином, щоб зварний шов знаходився посередині зразка (рис. 12). Зразки типу МІ-50 використовували для визначення ударної в’язкості матеріалу. Також були зроблені

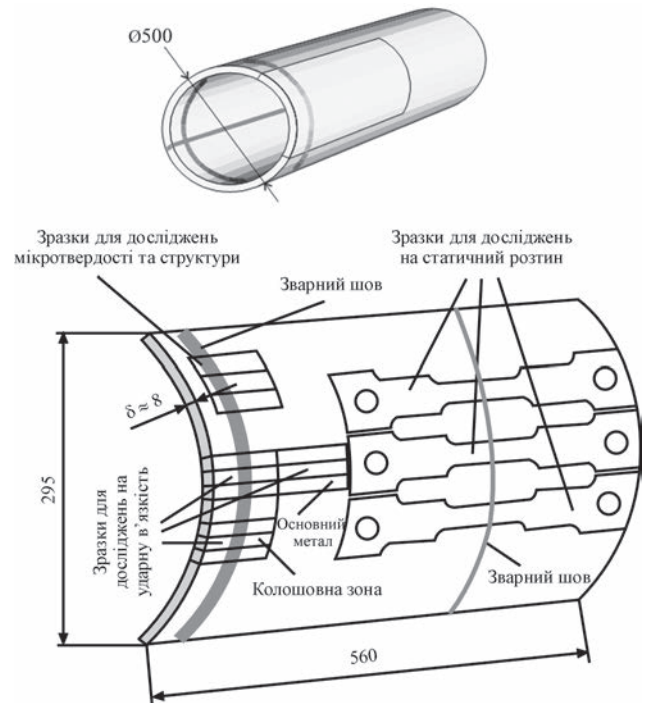


Рис. 11. Схема виготовлення зразків з фрагменту контрольованої труби

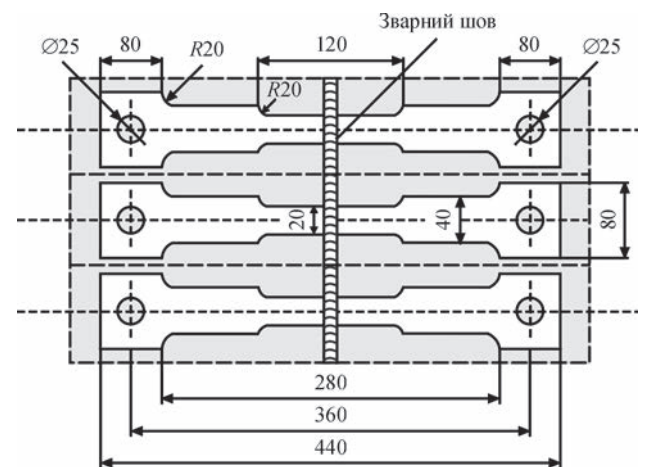


Рис. 12. Схема виготовлення зразків АЕ-01Р для АЕ дослідження при статичному розтягненні

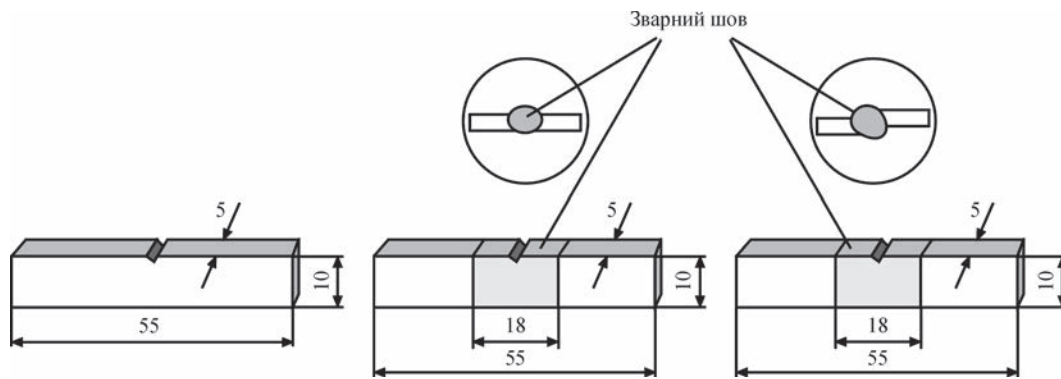


Рис. 13. Схема виготовлення зразків MI-50 для випробувань на ударну в'язкість

зразки в формі прямокутного паралелепіпеду, на яких досліджували мікротвердість матеріалу та проводили АЕ сканування шляхом подавання одним датчиком АЕ акустичного сигналу з одного торця паралелепіпеду та наступним отриманням зміненого сигналу іншим датчиком на другому торці [2, 9–11].

Макроструктурний аналіз проводили після травлення зразків у 20%-му водному розчині надсірчанокислого амонію. Мікроструктуру досліджували після травлення у ніталі (4%-му розчині азотної кислоти в етиловому спирті). Дослідження і фотозйомку мікроструктури проводили на мікроскопі «Полівар-мет». Твердість вимірювали твердоміром М-400 фірми «КОМПАС» з навантаженнями 25 гс (мікротвердість) та 1 кгс (інтегральна твердість).

Хімічний склад основного металу і металу зварного шва наведено в табл. 4.

Дослідження хімічного складу показало, що матеріал труби не відповідає паспортним характеристикам і не є сталлю 20. Ґрунтуючись на результатах хімічного аналізу досліджуваних зразків і нормах хімічного складу сталей, регламентованого ГОСТ 1050-88, можна зробити висновок, що труба виготовлена зі сталі 15пс (напівспокійна). Виготовлення труб з таких сталей допускається тільки за умови, що тиск газу в них не буде перевищувати 4 ат. Візуальним оглядом зварного темплета, представленого для дослідження, встанов-

лено, що по всій його довжині поверхня шва має грубошарову будову зі слідами підварів. У кореневій частині шва практично по всій його довжині є вм'ятини з боку кореня, непровари та окремі протічки металу. Шви пористі, з окремими шлаковими включеннями і шлаковими прошарками між швами (рис. 14, а). Глибина корневих непроварів в окремих випадках досягає 50...60 % товщини зварюваного металу (рис. 14, б, в). Зварювання проведене з великим зрушенням крайок (рис. 14, в) і зазором між ними. На зовнішній поверхні виробу, що зварюється, є напливи.

Забруднення неметалевими включеннями контролювали відповідно до ГОСТ 1778-70. Для їх визначення використовували кількісний мікроскоп марки «Омнімет». Встановлено, що основний метал забруднений в основному включеннями типу пластичних силікатів, розташованими головним чином в центрі зразків (по товщині листа). Відповідні фотографії наведені на рис. 15. Рівень забрудненості вказаними включеннями відповідає балу 4,5 згідно з ГОСТ 1778-70 (метод Ш1, шкала СП). Підрахунок забрудненості показав, що в найбільш забруднених місцях вміст пластичних силікатів складає 2,366 % за об'ємом. Інші включення (сульфіди, оксисульфіди) містяться в основному металі в дуже малих кількостях (менш ніж бал 1 згідно з ГОСТ 1778-70).

У металі швів виявлено окисли включень глобулярної форми розмірами від декількох мікрометрів до субмікронних (рис. 16). Кількісний аналіз

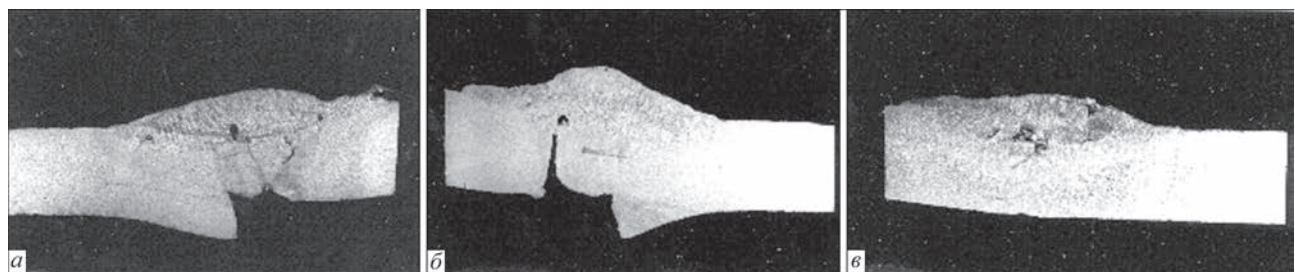


Рис. 14. Макроструктура (×2,5) зварних швів. Зразки I (а), II (б), III (в)

Таблиця 4. Хімічний склад основного металу і металу зварного шва досліджуваних зразків, мас. %

Об'єкт аналізу	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	[O]	[N]
Основний метал	00,137	00,138	00,40	00,05	<0,05	<0,03	<0,02	00,013	00,009	00,02	00,073
Зварний шов	0,129	0,430	0,90	0,06	0,05	<0,03	0,03	0,020	0,017	0,043	0,011



показав, що вміст неметалевих включень у верхніх валиках швів зразків I, II і III дорівнює відповідно 0,156, 0,122 та 0,105 % за об'ємом.

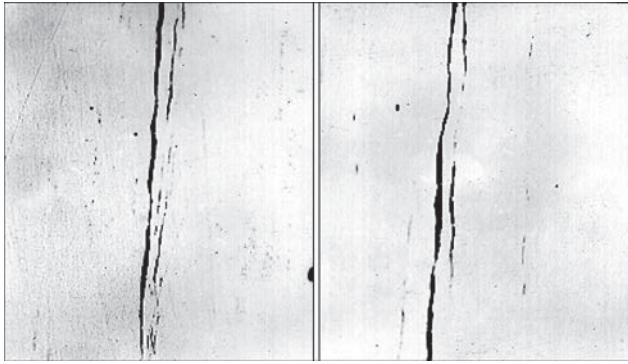


Рис. 15. Неметалеві включення в основному металі (пластичні силікати)

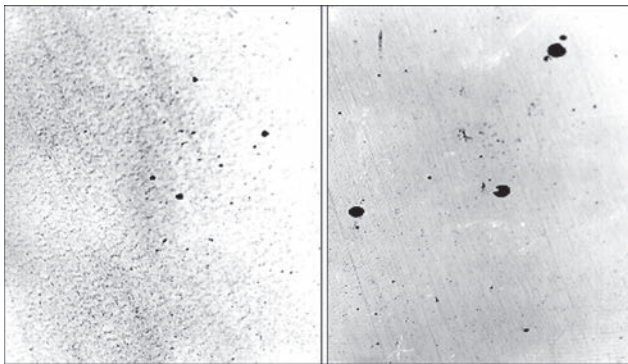


Рис. 16. Неметалеві включення (окисли) у металі шва

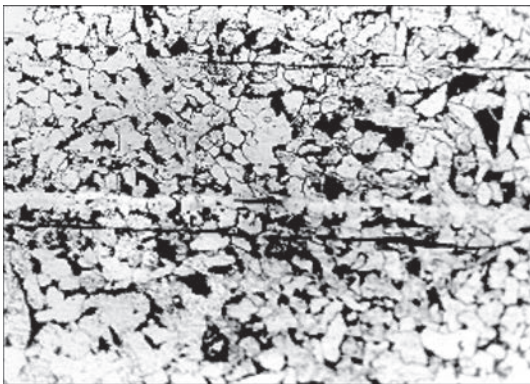


Рис. 17. Мікроструктура ( $\times 400$ ) основного металу

На мікрошліфах були детально досліджені дефекти та мікроструктура різних ділянок зварного з'єднання. Аналіз показав, що мікроструктура основного металу на всіх трьох зразках однакова. Вона являє собою ферит і перліт з смугастістю, відповідної балу 2 (ГОСТ 5640-68), і розміром зерна фериту, відповідним № 8 (ГОСТ 5639-82). Фотографії мікроструктури основного металу представлені на рис. 17.

Характерною особливістю структури основного металу є наявність білої смуги неоднорідності по центру зразка (в напрямку по товщині листа). Відомо, що такого типу ліквідаційні смуги часто бувають насичені вуглецем в кількостях, достатніх для випадання мартенситу.

Однак у досліджуваній сталі зазначена смуга складається з фериту. Це підтверджується зокрема вимірами мікротвердості, яка, як і відома мікротвердість зерен фериту, становить за Віккерсом  $HV - 1180 \dots 1300$  МПа. Інтегральна твердість основного металу дорівнює при цьому  $HV - 1450 \dots 1500$  МПа. У зразку I були досліджені дефекти при збільшенні, більшому, ніж при макродослідженні. Були виявлені нещільності, які можна охарактеризувати як пори (рис. 18). Мікроструктура верхнього шва являє собою суміш полігонального фериту, перліту та пластинчастого фериту з невпорядкованою другою фазою (рис. 19, а). Мікротвердість  $HV$  цих складових дорівнює відповідно  $1100 \dots 1300$ ,  $2200$  та  $1700 \dots 1800$  МПа. Інтегральна твердість верхнього шва становить  $1500 \dots 1600$  МПа. При збільшенні  $\times 40$  проглядається кореневий канал, заповнений шлаком, макропори та мікропори (рис. 18).

Мікроструктура нижнього шва, який піддався нагріву при накладенні верхнього шва, являє собою змішані ферит та перліт (рис. 19, б). На цьому ж фото показана зона сплавлення з основним металом. Чітко видно, що пластичні силікати в зоні сплавлення видозмінилися під впливом тепла зварювальної ванни. Зростання зерна в ділянці перегріву не зафіксовано.

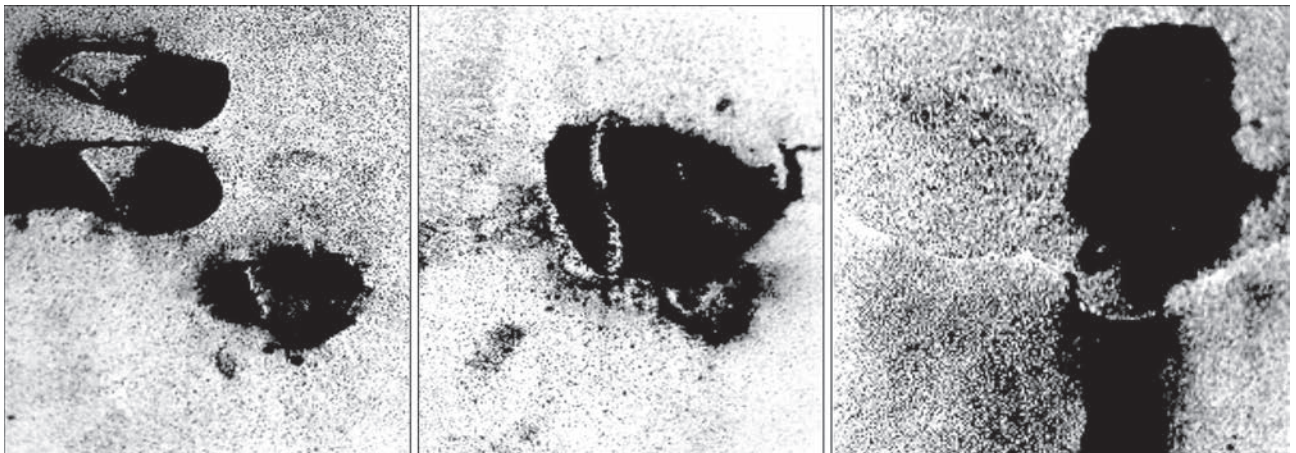


Рис. 18. Пори у шві зразка I ( $\times 40$ )

Аналіз мікроструктури зразка III також показав наявність в металі зварного з'єднання множинних дефектів. Так, поряд з порами спостерігаються непровари у формі коми, а також протяжні непровари, головним чином розташовані між валиками. На рис. 20 наведені фотографії металу зразка з непроварами, які являють серйозну небезпеку для експлуатованого трубопроводу, оскільки істотно знижують міцність зварних з'єднань в трубах. Мікроструктура та твердість різних ділянок зварного з'єднання в даному зразку не відрізняється від мікроструктури та твердості попередніх зразків на відповідних ділянках.

Слід зазначити, що в зонах термічного впливу всіх досліджених зразків не спостерігалось збільшення обсягів зерна в ділянках перегріву. В інших ділянках зони термічного впливу структура металу являє собою дрібнозернистий ферит і перліт. Твердість всіх ділянок зони термічного впливу не перевищує 2000 МПа.

Загальний висновок з хімічного та металографічного аналізу зварних швів показав, що множинні дефекти зварювання, а також використання іншої марки сталі замість проектноі призвели до руйнування сусідньої ділянки трубопроводу, але вони могли стати й причиною руйнування того фрагменту труби, який досліджувався.

Пошкодженість матеріалу показує і суттєве зниження ударної в'язкості. Для металу в стані по-

ставки вона складає 218 Дж/см<sup>2</sup>. Для зразків МІ-50 дані (табл. 5) дають чітке уявлення щодо стану як основного металу труби, так і зварних швів.

Як бачимо, у найгіршому випадку ударна в'язкість знизилася у 2,5 рази, а пошкодженість згідно з формулою (1) складе 60 %.

АЕ сканування [2, 8–10] трьох зразків у формі паралелепіпеду показало, що максимальна пошкодженість металу спостерігається у напрямку, перпендикулярному поверхні труби, та складає 68 %. Визначимо міцність матеріалу труби, вважаючи, що вона зроблена зі сталі 20, щоб отримати еталонні характеристики для порівняння з реальним матеріалом, з якого виготовлена труба. Вихідні параметри матеріалу є наступними: межа міцності  $\sigma_b = 440$  МПа, межа плинності  $\sigma_t = 288$  МПа, відносне подовження  $\psi = 28...34$  %, відносне звуження  $\psi = 28...34$  %, ударна в'язкість основного металу [ $a_{II}$ ] = 218 Дж/см<sup>2</sup>. Далі в розрахунок величиною  $\sigma$  будемо позначати товщину стінки труби, розглядаючи її як тонку ( $r/\delta \gg 10$ ) оболонку.

Розрахунок труби може бути проведено, з урахуванням співвідношення  $r/\delta = 41,34 \gg 10$  за формулою Лапласа для тонкої оболонки. Відповідно до згаданої формули напруження, що діють у трубі, будуть визначатися як  $\sigma = pr/(2\delta_{ef})$ , де  $\delta_{ef}$  – реальна товщина стінки оболонки. При виборі величини  $\sigma_{ef}$  слід враховувати, що від неї слід віднімати товщину непроварів і інших недосконаlostей, що змінюють реальну товщину стінки труби, не забуваючи також про те, що вони є

Таблиця 5. Ударна в'язкість металу труби ( $t_{випр} = 20$  °C)

Номер з/п	Ділянка труби	Ударна в'язкість, Дж/см <sup>2</sup>
1	Основний метал	187
2		170
3		165
4	Зварний шов	155
5		130
6		88
7	Зварний шов зі зміщенням крайок	182
8		155
9		140

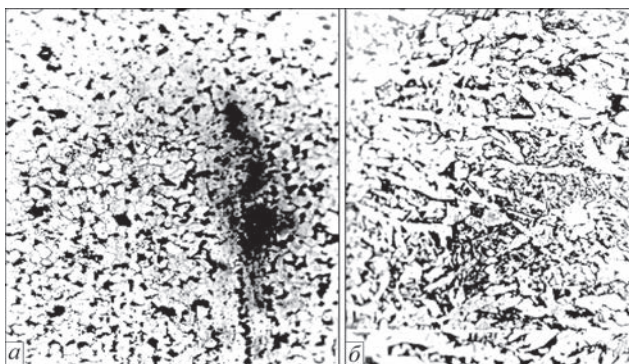


Рис. 19. Мікроструктура ( $\times 400$ ) верхнього шва (а) та зони сплавлення основного металу з другим швом (б)

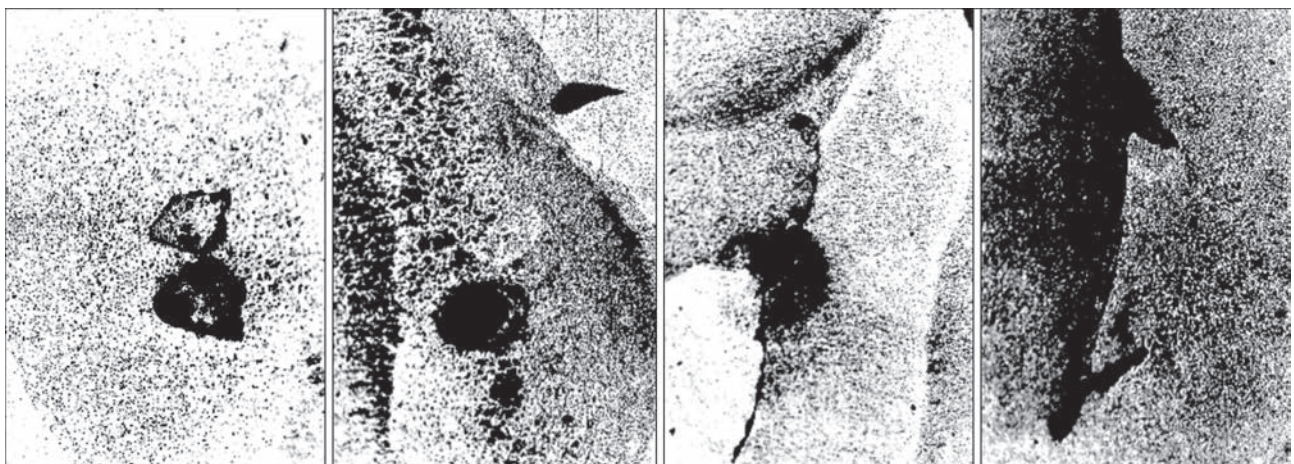


Рис. 20. Дефекти у зразку III ( $\times 40$ )

концентраторами напружень. Коефіцієнт концентрації напружень  $K$  для концентраторів такої форми дорівнює 4,5.

Таким чином, при заданих розмірах труби  $\sigma = 113,7$  МПа, що нижче  $\sigma_T = 288$  МПа. Отже, коли матеріал знаходиться у неокрихчованому стані, вплив концентрації напружень призведе до їх перерозподілу в зоні концентратору.

При окрихчуванні матеріалу пластичні деформації будуть відсутні та  $\sigma_{сф} = 113,7 \cdot 4,5 = 511,6$  МПа  $> \sigma_B$ . Отже, в зоні концентрації напруження перевищать межу міцності та відбудеться руйнування матеріалу. Рекомендованим заходом для недопущення руйнування є зниження робочого тиску до 20...25 ат. Оскільки за хімічним складом та іншими характеристикам матеріал відповідає сталі 15пс, для нього слід чекати ще нижчих показників працездатності.

Для завершення аналізу службових властивостей даної труби, включаючи зварні шви, слід проаналізувати результати АЕ досліджень зразків АЕ-01Р на статичний розтяг. Приведемо типові знімки екранів програми ЕМА-3.92 з результатами прогнозу руйнівного навантаження та відповідні ним графіки випробувань зразків із сталі 20 спочатку для матеріалу без напрацювання, узятого з аварійного запасу (рис. 21–22), а потім для матеріалу труби, що підлягав аналізу (рис. 23–24). Усі елементи екрану локації відповідають тим, що були описані вище для рис. 4 та в роботі [1]. Згори над локаційною схемою наведені результати прогнозу руйнівного навантаження та автоматичного перерахування їх програмою ЕМА в межу міцності згідно з відомими геометричними характеристиками зразка. На графіках (рис. 22, 24) стовпчиками показані амплітуди подій дискретної АЕ (мВ), навантаження  $P$  (кг) та сумарна крива  $N$  накопичення подій АЕ в залежності від часу випробувань.

Як бачимо з рис. 21, спрогнозована межа міцності повністю відповідає паспортним характеристикам сталі 20. Відзначимо також, що прогноз руйнівного навантаження, яке в реальності склало 9068 кг (рис. 22), відповідає

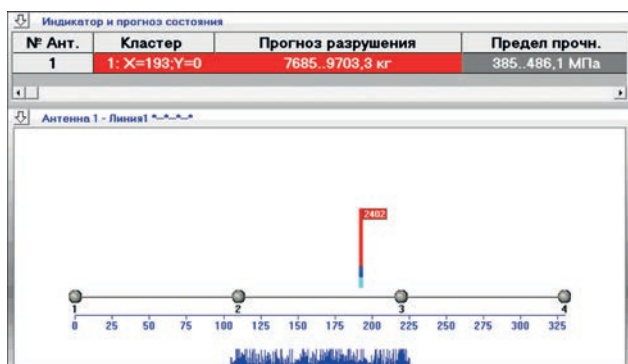


Рис. 21. Екран програми ЕМА-3.92 після випробування типового зразка сталі 20 з аварійного запасу

вимогам до його точності згідно сертифікату на системи типу ЕМА та вкладається в межі  $\pm 15\%$ .

Для графіку (рис. 22) характерним є наявність великої кількості подій з максимальними амплітудами. Крива накопичення пошкоджень (сумарна крива  $N$  амплітуд АЕ) має вигин, спрямований угору, та у значній мірі повторює криву навантаження. Як вказувалося в [1], це є свідомством відсутності зварного з'єднання в зразку.

Для випробуваного зразка з пошкодженої труби, який крім цього мав зварний шов, спрогнозована межа міцності суттєво нижча за паспортні характеристики сталі 20. Це підтверджує, по-

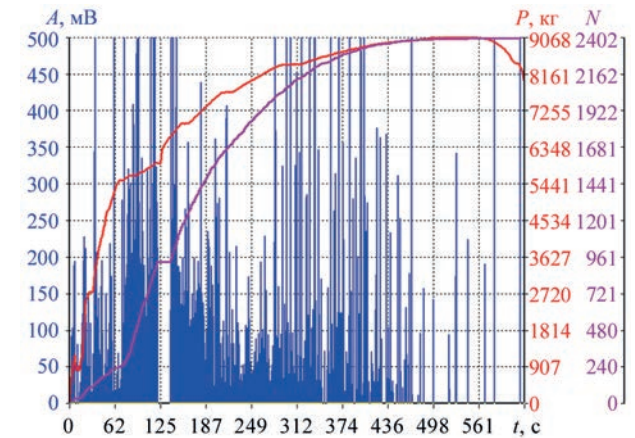


Рис. 22. Графік випробування типового зразка сталі 20 з аварійного запасу



Рис. 23. Екран програми ЕМА-3.92 після випробування типового зразка сталі 20 з пошкодженої труби

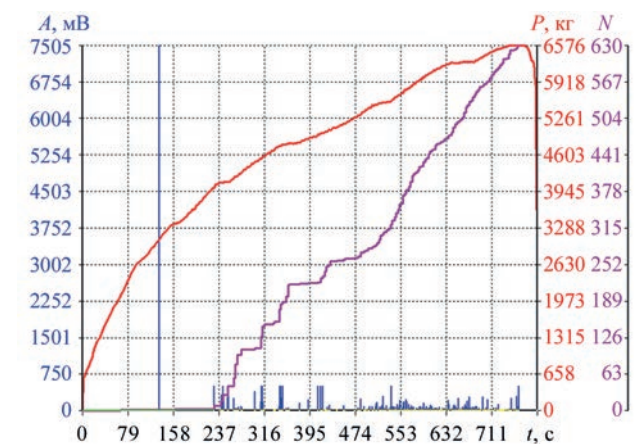


Рис. 24. Графік випробування зварного зразка з пошкодженої труби

перше, що випробувався інший матеріал (як вже вказувалося раніше, це сталь 15пс), по-друге, що матеріал пошкоджувався за механізмом виникнення, розвитку та злиття пор з подальшим утворенням тріщини. Відзначимо, що й у даному випробуванні прогноз руйнівного навантаження, яке в реальності склало 6576 кг (рис. 24), відповідає вимогам до його точності та вкладається в межі  $\pm 15\%$ .

Для графіка (рис. 24), у порівнянні з результатами випробування зразка з аварійного запасу, характерною є незначна кількість подій та вони більшою частиною мають низькі амплітуди. Крива накопичення пошкоджень (сумарна крива  $N$  амплітуд АЕ) має вигин, спрямований униз, та не повторює криву навантаження, що є свідомством наявності зварного з'єднання у зразку.

Згідно з формулою (1) вираховуємо пошкодженість зразка зі зварним з'єднанням порівняно з еталонним зразком з аварійного запасу. В якості параметру пошкодженості використовуємо суму подій  $N$ . Після підрахунків отримуємо значення пошкодженості 73 %. Про достовірність такого рівня пошкодження свідчать і усі попередні результати, підтверджені металографічними дослідженнями.

Оскільки даний показник пошкодженості є найбільшим з отриманих для даної труби, скористаємося ним для оцінки залишкового ресурсу. Згідно з номограмою (рис. 10), для пошкодженості 0,73 він складає  $\approx 10$  років. Враховуючи велику кількість знайдених дефектів, відмінність марки сталі від паспортної та ймовірне руйнування при перевантаженнях, була надана рекомендація замінити пошкоджені ділянки труби з такими показниками.

Таким чином, комплексне дослідження матеріалу з аварійно небезпечної труби дозволяє стверджувати, що метод АЕ є чутливим до зміни службових властивостей зварних швів і при своєчасному застосуванні може допомогти запобіганню аварійних ситуацій.

## Висновки

1. Показано високу чутливість методу АЕ до виникнення та розвитку в зварних швах дефектів різних типів як під час процесу зварювання, так і при подальшій їх експлуатації.

2. Показником, який міг би використовуватися для контролю якості при виконанні зварювання, може служити час, за який зникає акустична активність після завершення зварювання.

3. На прикладі змійовика печі П-101 показано, що метод АЕ є ефективним під час контролю великогабаритних потенційно небезпечних конструкцій з великою кількістю зварних швів, причому

контроль великих поверхонь може бути здійснений мінімальним числом датчиків (у даному випадку чотирма). З використанням додаткових методів контролю показано, які саме дефекти є характерними для різних ділянок змійовика печі П-101.

4. Запропоновано метод інтегральної оцінки пошкодженості об'єктів такого типу. Зворотна перевірка показала, що запропонована авторами методика розрахунку залишкового ресурсу є справедливою для таких об'єктів.

5. На прикладі аварійної ділянки труби з магистрального газопроводу показано, як можна комплексно оцінити пошкодженість основного металу та зварних з'єднань, використовуючи різні методи. За допомогою методу АЕ підтверджений висновок, зроблений у Частині 1, щодо можливості за нахилом кута сумарної кривої подій АЕ визначити наявність зварного з'єднання у матеріалі.

6. Підтверджено, що для зварних з'єднань можна використовувати прогноз руйнівного навантаження, який виконується системами типу ЕМА. Показано, що крім власне руйнівного навантаження можливим є його коректний автоматичний перерахунок у межу міцності. Отримані результати перерахунку співпадають з механічними властивостями досліджених матеріалів, визначеними іншими методами.

7. Промислове застосування методу АЕ є ефективним методом оцінки службових властивостей зварних з'єднань, що є вельми важливим, тому що вони являють один з основних чинників пошкодження конструкцій, що експлуатуються. Безперервний АЕ моніторинг забезпечує найбільш надійну гарантію запобігання аварійним ситуаціям, оскільки метод АЕ одразу реагує на найменші зміни у стані матеріалу.

## Список літератури

1. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. та ін. (2021) Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 1. Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію. *Автоматичне зварювання*, 2, 52–59. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>.
2. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: уч. пособие. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
3. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики к ЕМА-3.9. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 16–22.
4. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal. ASME Turbo expo: power for land, sea, and air: cycle innovations; industrial and cogeneration; manufacturing materials and metallurgy. *Marine*, 4, 799–805.
5. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
6. Zhang, L., Basantes-Defaz, A.C., Ozevin, D. et al. (2019) Real-time monitoring of welding process using air-coupled ultrasonics and acoustic emission. *Int J. Adv Manuf*

- Technol*, 101, 1623–1634. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3042-2>.
7. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2003) О применении акустической эмиссии для контроля промышленных конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 3–6.
  8. Щербинский В.Г., Феоктистов В.А., Полевик В.А. и др. (1987). *Методы дефектоскопии сварных соединений*. Москва, Машиностроение.
  9. Недосека С.А. (2010) *Діагностика і прогнозування ресурсу зварних конструкцій методом акустичної емісії*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ.
  10. Недосека С.А., Недосека А.Я., Бойчук О.І. та ін. (2020) Особливості акустичної емісії при оцінці стану матеріалу. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 3–12. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.01>.
  11. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там само*, **1**, 9–16.
  12. Карлов С.А., Сульженко В.А., Яковлев А.В. (2019) Акустико-эмиссионный контроль качества сварных швов морской техники. *Труды Крыловского государственного научного центра*. Специальный выпуск.
  13. Иванов А.Б., Иевлев В.А., Неуступов А.С. и др. (2019) Внедрение нового способа контроля качества монтажных сварных соединений трубопроводов. *Труды Крыловского государственного научного центра*. Специальный выпуск 2.
  14. Droubi, Mohamad & Faisal, Nadimul & Orr, Fraser & Steel, John & El-Shaib, Mohamed. (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**. 10.1016/j.jcsr.2017.03.012.
  15. Aboali, Abdalla et al. (2014) Screening for Welding Defects Using Acoustic Emission Technique. *Advanced Materials Research*, vol. 1025–1026, Trans Tech Publications, Ltd., Sept. 2014, pp. 7–12. Crossref. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7.
  16. Савченко С.В., Тимчик Г.С. (2017) Метод контролю зварних з'єднань балістичних сталей за допомогою акустичної емісії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. Том 20.
  17. Скальський В. Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 29–36.
  3. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 16–22 [in Russian].
  4. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal. ASME. Turbo expo: Power for land, sea, and air: cycle innovations; industrial and cogeneration; manufacturing materials and metallurgy. *Marine*, **4**, 799–805.
  5. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
  6. Zhang, L., Basantes-Defaz, A.C., Ozevin, D. et al. (2019) Real-time monitoring of welding process using air-coupled ultrasonics and acoustic emission. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **101**, 1623–1634. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3042-2>.
  7. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2003) About application of acoustic emission method for control of industrial structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 3–6 [in Russian].
  8. Shcherbinsky, V.G., Feoktistov, V.A., Polevik, V.A. et al. (1987) *Methods of flaw detection of welded joints*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
  9. Nedoseka, S.A. (2010) *Diagnostics and prediction of service life of welded structures by acoustic emission method*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Kyiv [in Ukrainian].
  10. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Boichuk, O.I. et al. (2020) Features of acoustic emission at evaluation of the state of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3–12 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.01>.
  11. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Ibid.*, **1**, 9–16 [in Russian].
  12. Karlov, S.A., Sulzhenko, V.A., Yakovlev, A.V. (2019) Acoustic emission control of weld quality in marine engineering: *Transact. of Krylov State scientific center*. Special Issue [in Russian].
  13. Ivanov, A.B., Ievlev, V.A., Neustupov, A.S. et al. (2019) Implementation of a new method for quality control of field welded joints of pipelines: *Transact. of Krylov State scientific center*. Special Issue 2 [in Russian].
  14. Droubi, Mohamad & Faisal, Nadimul & Orr, Fraser & Steel, John & El-Shaib, Mohamed (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**. 10.1016/j.jcsr.2017.03.012.
  15. Aboali, Abdalla et al. (2014) Screening for welding defects using acoustic emission technique. *Advanced Materials Research*, Vol. 1025–1026, Trans. Tech. Publ., Ltd., Sept. 2014, 7–12. Crossref. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7.
  16. Savchenko, S.V., Timchik, G.S. (2017) Method of control of welded joints on ballistic steels using acoustic emission. *Visnyk NTU KhPI*. Series: Mechanical-technological systems and complexes, Vol. 20 [in Ukrainian].
  17. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solid, based on acoustic emission signals. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29–36 [in Ukrainian].

## References

## METHOD OF ACOUSTIC EMISSION AT EVALUATION OF THE STATE OF WELDS AND THEIR SERVICE PROPERTIES. Part 2. Practical application

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

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

E-mail: [inpat59@paton.kiev.ua](mailto:inpat59@paton.kiev.ua)

The majority of existing structures contain welded joints. Questions of monitoring service characteristics of welded joints, using acoustic emission method are considered. Attention is given to a change in material properties of operating structures with welded elements after long-term service, taking into account the time and probable violation of service conditions. Examples of evaluation of the change in properties of welded structure materials by the data of acoustic emission, determination of their damage and residual service life, are given. 17 Ref., 5 Tabl., 24 Fig.

**Keywords:** welds, service properties, acoustic emission (AE), AE activity, AE scanning, damage, destruction

Надійшла до редакції 22.03.2021