

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗМІН ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 17Г1С ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.М. Гур'янов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@ukr.net

Сталь 17Г1С є широко застосованою у трубопроводах. Зміна фізичних властивостей цього матеріалу з часом залежить від умов експлуатації газопроводу та середовища, у якому знаходиться труба. Пошкодженість матеріалу внаслідок експлуатаційного напруження далеко не завжди призводить до зміни стандартних характеристик матеріалу, таких як σ_B , σ_T , K_{1C} та ряду інших. У той же час такий матеріал може бути суттєво пошкодженою, а традиційні методи не дозволяють цього визначити. Завдання даної роботи — показати чутливість методу акустичної емісії до змін властивостей сталі 17Г1С після 15-ти років експлуатації магістрального газопроводу. Результати випробувань показують, що параметри акустичної емісії, що аналізуються, суттєво змінюються під впливом експлуатаційного напруження і можуть бути характеристиками для оцінки поточного стану пошкодженого матеріалу. Бібліогр. 6, рис. 5.

Ключові слова: акустична емісія (АЕ), фізичні властивості, АЕ моніторинг, механічні випробування

Сталь 17Г1С широко застосовується у трубопроводах і, зокрема, газопроводах. Зміна деяких властивостей цього матеріалу з часом є досить істотною і залежить від умов експлуатації газопроводу та середовища, у якому знаходиться труба [1].

Характерно, що пошкодженість матеріалу внаслідок експлуатаційного напруження далеко не завжди призводить до зміни стандартних характеристик матеріалу, таких як σ_B , σ_T , K_{1C} та ряду інших. Внаслідок цього такий матеріал може бути суттєво пошкодженою, а традиційні методи не дозволяють цього визначити.

У даній роботі зміну властивостей сталі оцінювали шляхом розтягу еталонних, непошкоджених зразків та зразків, вирізаних з труби після тривалої експлуатації, у розривній машині з реєстрацією навантажень та подовження, а також параметрів акустичної емісії (АЕ).

На відміну від світової практики [1–3], технологія оцінки стану матеріалу, розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [4, 5], базується лише на отриманні даних щодо АЕ активності матеріалу та параметрів навантаження, у той час як більшість відомих досліджень потребують багатоступінчастої процедури оцінки, у якій методу АЕ відведено роль початкового ступеня, на якому визначають АЕ активність на окремих ділянках та координати цих ділянок. Надалі вказані дослідження потребують додаткового вивчення матеріалу на ділянках, визначених методом АЕ як небезпечні. Ці дослідження включають вирізання зразків-свідків та вивчення їх механічних властивостей з подальшим розрахунком коефіцієнтів

інтенсивності напружень, або, як альтернативу, використання додаткових методів неруйнівного контролю, перш за все ультразвукового (УЗК), за допомогою яких визначають форму та розміри дефектів, а надалі знов таки виконуються розрахунки механічних властивостей з урахуванням форми знайдених дефектів і вирахуванням зазвичай тих самих коефіцієнтів інтенсивності напружень, і на цьому показнику базується аналіз стану матеріалу. Така багатоступінчаста оцінка, по-перше, є досить складною у виконанні, по-друге, не дозволяє оцінити стан матеріалу у реальному часі.

Системи типу ЕМА кількох поколінь, розроблені у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, мають вбудовану технологію оцінки стану матеріалу у реальному часі з прогнозуванням руйнівного навантаження, яка базується на розпізнаванні образів [4–6]. Це дозволяє суттєво прискорити якісну та кількісну оцінку стану без використання додаткових методів з нормованою точністю (похибка у межах $\pm 15\%$) та ймовірністю 95%. У даній роботі показані, зокрема, результати прогнозування руйнівного навантаження під час випробувань зразків на статичний розтяг.

Результати отримуємо при розтягуванні зразків зі сталі 17Г1С на машині Р20. На рис. 1 представлені схема навантаження та розташування зразка у розривній машині.

Представлена на рис. 1 схема є універсальною для більшості АЕ випробувань зразків, включаючи температурні. Нижче наведено діаграми показань АЕ приладу під час розтягування типових зразків з матеріалу у стані постачання та зразків

Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>, Гур'янов О.М. <https://orcid.org/0000-0001-9566-1706>

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.М. Гур'янов, 2023

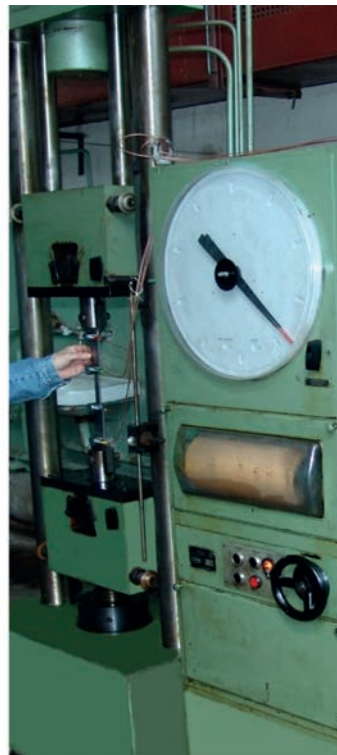
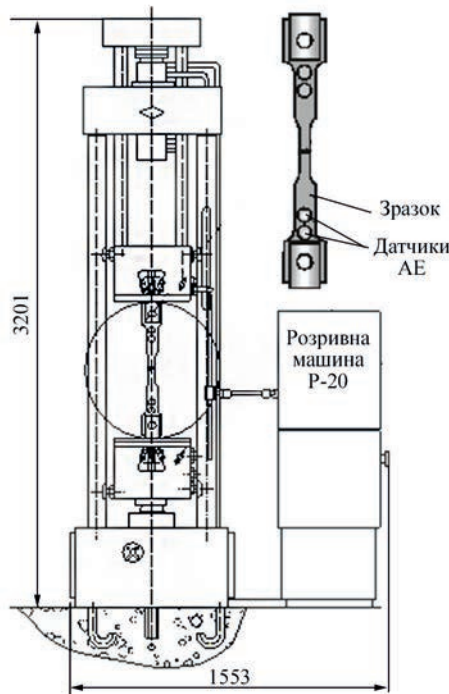


Рис. 1. Зразок та схема його встановлення в машині Р20

з пошкодженого матеріалу, вирізаних з труби після 15-ти років транспортування газу. АЕ системи типу ЕМА можуть у реальному часі та під час наступних повторювань проведених вимірювань на комп'ютері надати досить велику кількість параметрів, зокрема:

1. Зовнішні силові поля: у даному експерименті P – поточне навантаження, кг; e – подовження, мм.

2. A – максимальна амплітуда найбільшої у даний час події, що розглядається, мВ, умовно характеризує об'єм, що утворив дефект під час його динамічного розвитку.

3. Rt (W) – час наростання найбільшого у сумі подій цього часу чи його тривалість, мкс, характеризує зміцнення матеріалу внаслідок деформування.

4. O – кількість осциляцій у події АЕ, характеризують кількість пошкоджень, що виникли на даний момент часу.

5. A_c – сумарна амплітуда подій АЕ за час випробувань, дБ, характеризує загальний обсяг пошкоджень, що утворилися.

6. O_c – сумарна кількість пошкоджень у матеріалі за аналізований проміжок часу, що визначається за сумою осциляцій подій АЕ.

7. N_c – накопичені в процесі руйнування події АЕ, характеризують загальну кількість пошкоджень, які виникли за проміжок часу, що розглядається, може не збігатися з O_c .

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

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

10. n – активність АЕ за вибраний момент часу, 1/с.

11. N – сума подій в аналізованій час, характеризує кількість дефектів, що виникли у часі, може збігатися з O_c .

12. X, Y – опосередковані із заданою ймовірністю координати суми подій, які виникли в момент часу, що розглядається, на певній ділянці зразка або конструкції, мм. Розмір ділянки визначається автоматично залежно від розмірів об'єкта контролю та схеми розташування датчиків АЕ.

Ураховуючи те, що достатньо показовими можуть бути не обов'язково всі перелічені параметри, у вікні локаційної антени та побудованих графіках будуть розглядатися такі параметри як P, e, A, Rt, n, N, X . Вони забезпечують повну картину процесу накопичення пошкоджень під час випробувань і дають наочну демонстрацію змін властивостей у пошкодженому матеріалі порівняно з металом у вихідному стані.

Окрім сказаного вище, системи типу ЕМА мають функціонал, що дозволяє у реальному часі та після повторного перегляду проведених вимірювань на комп'ютері прогнозувати руйнівне навантаження, результати якого також надані у цьому дослідженні.

На рис. 2 представлено екран локації програми ЕМА з миттєвими значеннями АЕ параметрів, що виникли при випробуванні зразка зі сталі 17Г1С у стані постачання. У цей момент у вікні представлено такі дані:

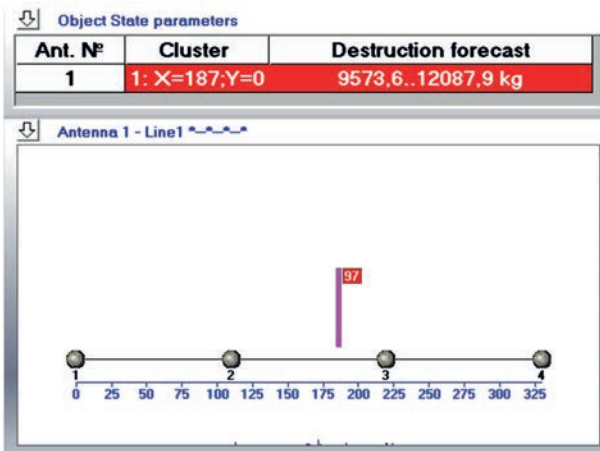


Рис. 2. Вікно локації програми ЕМА з АЕ даними, накопиченими під час процесу випробувань зразка у вихідному стані

1. Вгорі ліворуч надані координати кластера (Cluster), що вказують на прогнозоване місце руйнування. По мірі навантаження зразка координати уточнюються.

2. Вгорі праворуч надано прогнозоване руйнівне навантаження (Destruction forecast) у діапазоні 9573...12087 кг, що відповідає реальним даним, зафіксованим апаратурою. Слід зазначити, що прогнозоване значення руйнівного навантаження з'явилося у вікні при навантаженні, що становить приблизно 30 % від дійсного руйнівного, яке дорівнює 11758 кг (рис. 3). Прогнозні значення попадають у діапазон вимог до систем типу ЕМА щодо прогнозу руйнування $\pm 15\%$.

3. Нижче у вікні показано стовпчик поєднаних у кластер подій АЕ, які відображують накопичення пошкоджень у зразку із зазначенням координати X ймовірного місця руйнування. Нижче схематично показано зразок з розташованими на ньому датчиками АЕ (їхні номери та координати розташування).

4. Ще нижче показано справжні значення сигналів АЕ, що накопичуються в контрольованій ділянці. Відзначимо, що на рис. 2, який є моментальним знімком екрану програми ЕМА на момент прогнозу руйнування, АЕ події з великими амплітудами ще відсутні, вони з'являються пізніше, під час руйнування зразка.

5. Діаграма працює з початком випробувань та простежує у динаміці всю кінетику руйнування.

Детальну кінетику руйнування зразка представлено на рис. 3. Для зручності сприйняття дані випробувань розділені по двох графіках.

На графіку на рис. 3, а показано:

1. Стовпчики – амплітуди A подій АЕ у лінійному режимі вимірювань. Ліворуч на осі показано шкалу амплітуд, максимум не може перевищувати 500 мВ.

2. Лінія – робоче навантаження P . Праворуч на осі показано величину реального руйнівного навантаження 11758 кг.

3. Точки – активність n АЕ подій у часі. Праворуч на осі показано величину n , максимум якої дорівнює 18.

На графіку на рис. 3, б показано:

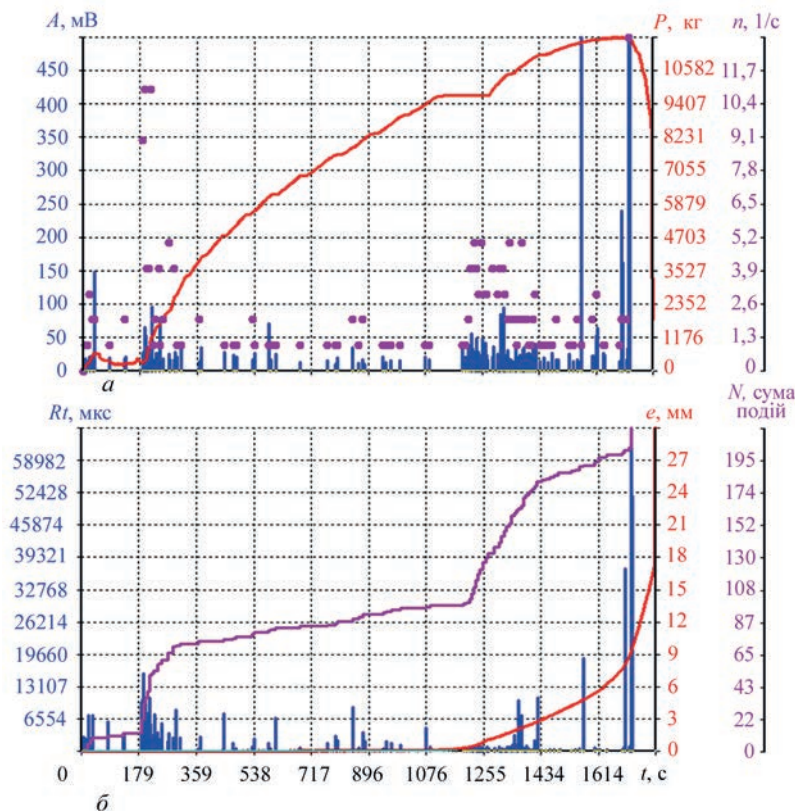


Рис. 3. Графіки розвитку процесу руйнування зразка із сталі 17Г1С у вихідному стані

1. Стопчикики – час наростання амплітуди подій АЕ до максимуму Rt . Ліворуч на осі показано шкалу Rt , максимум не може перевищувати 65535.

2. Плавна експоненційна крива, як починає зростати приблизно після 1000 с навантаження, показує подовження e . Праворуч на осі показано величину e , максимум якої дорівнює 30 мм – в момент руйнування зразка.

3. Ступінчаста крива показує поступове накопичення пошкоджень у зразку, яке відображує сума подій N . Загалом їх кількість становила 217.

Як бачимо, у вихідному матеріалі ефект Кайзера відсутній – події АЕ починають формуватися одразу ж з початком навантаження, а крива їх накопичення має типовий вигляд для непошкодженого матеріалу. Відзначимо очевидну наявність площадки плинності, при якій деформація зростає на ділянці горизонтальної кривої навантаження.

Розрив зразка характеризується сплесками амплітуд АЕ до максимуму ще до досягнення межі міцності та безпосередньо під час її досягнення.

Зовсім інша картина спостерігається для зразка, вирізаного з труби після 15-ти років експлуатації (рис. 4, 5). Параметри, що наведено на рис. 2, 4, ті ж самі, параметри на графіках рис. 3, 5 також ті самі, але характер їх суттєво змінився.

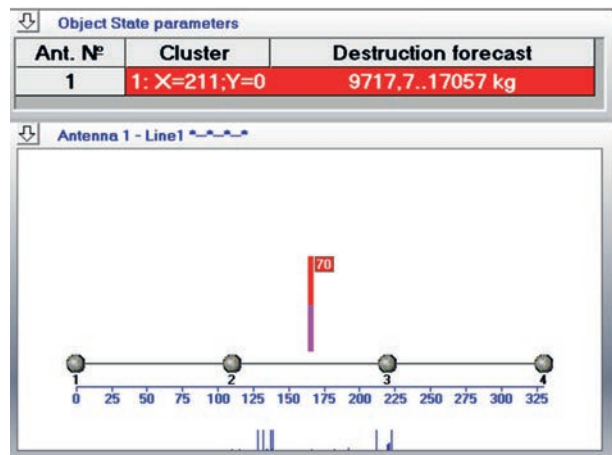


Рис. 4. Вікно локації програми ЕМА з АЕ даними, накопиченими під час процесу випробувань зразка у пошкодженому стані після 15-ти років експлуатації

Зразок зміцнився через 15 років експлуатації під час транспортування газу, про що свідчить зменшення подовження – з 30 до 15,9 мм при руйнівному навантаженні, яке виросло незначно – з 11758 до 11886 кг. Чітко простежується ефект Кайзера – на початковій стадії навантаження події АЕ відсутні.

Під час експлуатації газ поступово проникає у матеріал труби, викликаючи її поступове окрихчування, підвищення рівня жорсткості руйнування, старіння матеріалу труби [4, 5]. Це підтверджують різке зменшення параметру тривалості зростаючої частини події Rt , загальної суми подій АЕ $N = 70$

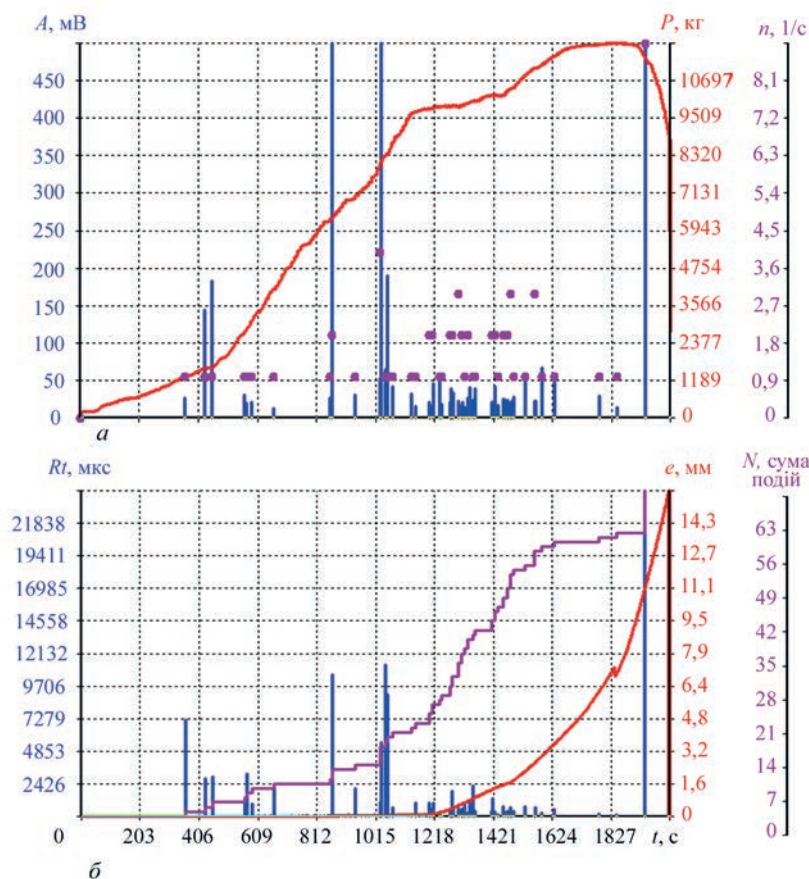


Рис. 5. Графіки розвитку процесу руйнування зразка зі сталі 17Г1С у пошкодженому стані після 15-ти років експлуатації

(у вихідному матеріалі їх було 217), тобто кількість пошкоджень у матеріалі після тривалої експлуатації різко зменшується. Збільшення відсотка подій АЕ з максимальними амплітудами відносно кількості самих подій – це результат окрихчування.

Удвічі зменшилася АЕ активність n , що також свідчить про зміцнення матеріалу після експлуатації.

Розглядаючи далі зміну АЕ параметрів у процесі випробувань, помітно, що у пошкодженому матеріалі АЕ події масово настають не одразу, а через певний час. У даному випадку це відбувається при $t = 400$ с і далі інтенсивніше при $t = 1010$ с (саме з цього моменту починається активне зростання деформації зразка), що вказує відповідно до ефекту Кайзера на те, що матеріал труби в процесі експлуатації працював під навантаженням приблизно 27 ат та що напруження для аналізованої труби (діаметр 1020 мм, товщина стінки 8 мм) складає приблизно 173,4 МПа. У той же час слід зазначити, що прогресуюче окрихчування матеріалу труби може призвести до руйнування при аварійних переміщеннях ґрунту, у якому прокладено трубу, внаслідок підмивання та зсувів.

Таким чином, показано достатню чутливість методу АЕ до змін властивостей сталі 17Г1С після тривалої експлуатації при збереженні якості оцінки стану і своєчасному попередженню про руйнування і прогнозі руйнівного навантаження.

Висновки

1. Метод АЕ показав достатню чутливість до змін властивостей сталі 17Г1С після тривалої експлуатації. Практично всі параметри АЕ, що аналізувалися, реагують якісно і кількісно на вказані зміни. Отримати відповідні якісні та кількісні показники вдалося, порівнюючи результати випробувань зразків з аварійного запасу на статичний розтяг з реєстрацією параметрів АЕ з результатами випробувань зразків аналогічної конфігурації, вирізаних з магістрального газопроводу після 15-ти років експлуатації.

2. Безперервний вплив на матеріал труби газу, що транспортується, призводить до істотної зміни низки властивостей матеріалу (див., зокрема, [4, 5]). Найсильніше змінюється пластичність, що в експерименті проявляється зменшенням часу наростання подій АЕ до максимуму, зменшенням загальної кількості подій АЕ при значному збільшенні відсотка подій з високими амплітудами. На практиці зменшення пластичності призводить до крихкості матеріалу труби та до небезпеки руйнування при виникненні аварійних переміщень труби в ґрунті.

3. Проведені випробування дозволили отримати дані про вплив попередніх, протягом 15-ти років, навантажень під час експлуатації труби зі сталі 17Г1С на зміну властивостей цього матеріалу, що проявилось у суттєвій кількісній та якісній зміні низки параметрів АЕ.

Список літератури/References

- Junyu, Chen, Yunwen, Feng, Cheng, Lu, Chengwei, Fei (2021) Fusion Fault Diagnosis Approach to Rolling Bearing with Vibrational and Acoustic Emission Signals. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 129(2), 1013–1027. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmcs.2021.016980>
- Amirabbas, Haidarpour, Kong, Fah Tee (2020) Finite Element Model Updating for Structural Health Monitoring. *Structural Durability & Health Monitoring*, 14(1), 1–17. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2020.08792>
- Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій*. Науково-технічний посібник. У 3-х томах. Київ, Наукова думка.
- Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structural elements*. Sci.-Tekhn. Manual. In: 3 Vol., Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: Учебное пособие*. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures: Manual*. 5th Ed. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
- Недосека А.Я., Недосека С.А. (2021) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций: Учебное пособие*. Глава 7. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2020) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures: Manual*, Chapt. 7. 5th Ed. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Indprom [in Russian].
- Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–9. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 3–9 [in Russian].

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD TO EVALUATE THE CHANGES IN THE PROPERTIES OF 17G1S STEEL AFTER LONG-TERM SERVICE

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

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: inpat59@ukr.net

17G1S steel is widely used in pipelines. Change in the physical properties of this material with time depends on the conditions of gas pipeline operation and pipe environment. Material damage due to operating time by far not always leads to a change of such standard characteristics of the material as σ_t , σ_y , K1C and a number of others. At the same time, such material can be significantly damaged, but the traditional methods do not allow determining it. The objective of this work is to demonstrate the sensitivity of acoustic emission method to changes in 17G1S steel properties after 15 years of the main gas pipeline operation. Testing results show that the analyzed acoustic emission parameters change essentially under the impact of operating time, and they can be the characteristics for evaluation of the current state of the damaged material. 6 Ref., 5 Fig.

Keywords: acoustic emission (AE), physical properties, AE monitoring, mechanical testing

Надійшла до редакції 07.05.2023