

ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ ТРІЩИНИ, СПРИЧИНЕНОЇ РОЗШАРУВАННЯМИ В ЕКСПЛУАТОВАНІЙ ФЕРИТНО-ПЕРЛІТНІЙ СТАЛІ, НА ЇЇ В'ЯЗКІСТЬ РУЙНУВАННЯ

О. І. ЗВІРКО, О. Т. ЦИРУЛЬНИК, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА,
О. І. ВЕНГРИНЬОК, Г. М. НИКИФОРЧИН

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

Методом J -інтеграла визначено в'язкість руйнування сталі 17Г1С (аналог API 5L X52) з труб резерву та експлуатованої 38 років на магістральному газопроводі, щоб оцінити його придатність для транспортування водню. Випробувано поздовжні та поперечні балкові зразки з односторонньою втомною тріщиною за навантаження три-точковим згином. На поперечних зразках не виявлено типового зниження рівня $J_{0,2}$ експлуатованої сталі проти властивого їй у вихідному стані. Фрактографічний аналіз ділянок статичного підростання від вершини втомної тріщини підтвердив присутність мікророзшарувань, які були чіткішими на зламах експлуатованого металу та на поперечних зразках. Найінтенсивніше розшарування зі складною морфологією тріщини підростання пов'язали з поділом її фронту на дрібніші ділянки активного росту та галуженням. Таку особливість розглядали як чинник релаксації напружень у вершині статичної тріщини і підвищення в'язкості руйнування сталі.

Ключові слова: *трубна сталь, транспортування водню, метод J -інтеграла, в'язкість руйнування, розшарування, галуження тріщини, поділ фронту тріщини.*

Fracture toughness of 17H1S steel (analogue to API 5L X52) of the reserve pipe and pipe operated for 38 years on the gas main pipeline was determined using the J -integral method to assess its serviceability for hydrogen transportation. Longitudinal and transverse relative to the rolling direction beam specimens with a single-edge fatigue crack under three-point bending loading were tested. For transverse specimens, the typical regularity of the lower value of $J_{0,2}$ of the operated steel compared to its initial state is not fulfilled. The fractographic analysis of the static crack growth zone from the fatigue crack tip confirmed the presence of delaminations at the steel fracture surface, which were more pronounced for the operated metal and transverse specimens. The most intense delamination with a complex morphological crack growth was associated with crack front division into smaller areas of its active growth and branching. Such a feature was considered a factor of stress relaxation at the tip of a static crack and an increase in the steel fracture toughness.

Keywords: *pipe steel, hydrogen transportation, J -integral method, fracture toughness, delamination, crack branching, crack front division.*

Вступ. Тривала експлуатація газопроводів може супроводжуватися втратою пластичності, опору крихкому руйнуванню та пошкодженістю трубних сталей [1–5], що підвищує ризики аварійних відмов. Транспортування водню створює додаткові виклики, пов'язані з наводнюванням від внутрішньої поверхні труб [6–10], що може спричинити водневе окрихчення металу і через зниження критичного рівня в'язкості руйнування, і через субкритичне втомне чи статичне підростання тріщин. Ці негативні ознаки проявляються тим відчутніше, що менші пластичність та опір сталей крихкому руйнуванню [1, 11, 12]. Як наслідок зроста-

ють ризики втрати цілісності трубопроводу. Розглядають різні механізми проникнення водню у метал за таких умов (від безпосередньої його дисоціації, яка полегшується на свіжоутвореній поверхні, особливо за наявності дефектів типу тріщин, до участі в електрохімічних реакціях взаємодії з конденсованою вологою) [4]. Відповідно зростає потреба в оцінюванні ступеня окрихчення металу під час його взаємодії з наводнювальними середовищами за певними механічними властивостями, найчастіше – пластичністю, ударною в'язкістю та опором росту тріщини. Однак саме показники опору крихкому руйнуванню чутливіші, ніж характеристики пластичності, до експлуатаційної деградації сталей [1, 2, 12]. Водночас поряд з ударною в'язкістю до таких досліджень залучають підходи механіки руйнування, зокрема, з визначенням в'язкості руйнування, що характеризує опір сталей крихкому руйнуванню за появи тріщиновидних дефектів [1, 7, 8, 12–18]. До низькоміцних, а отже, високопластичних сталей, для яких підходи лінійної механіки руйнування некоректні, використовують метод J -інтеграла [7, 8, 13, 15–17], хоч це ускладнює експериментальну процедуру встановлення тріщиностійкості.

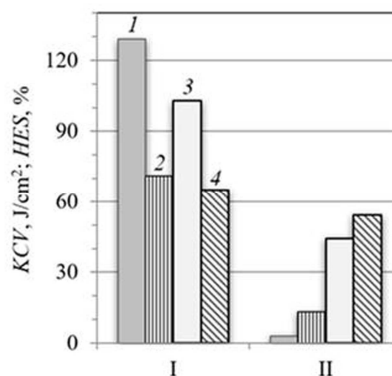
Інший чинник окрихчення трубних сталей – витягнуті вздовж осі труби неметалеві включення та волоконна мікроструктура, що утворюються внаслідок вальцювання і спричиняють схильність до розшарувань як на стадії виготовлення труб, так і їх експлуатації [4, 8, 11]. Зі збільшенням терміну експлуатації розшарування інтенсифікується, що пояснюють впливом не лише механічних навантажень, але і водню [4, 11]. Існує загальне правило, що через пошкодження металу розшаруваннями знижується його в'язкість руйнування. Однак можливий і протилежний ефект, зумовлений ускладненням морфології тріщин через їх галузження та криволінійність траєкторії. У цьому випадку схильність сталі до розшарування виступає чинником релаксації напружень під час визначення в'язкості руйнування. Тут може проявитися тенденція позитивного впливу розшарувань на опір росту тріщини.

Нижче досліджено морфологію тріщини та її роль у зоні переходу від втомного до статичного росту за випроб на в'язкість руйнування низькоміцної трубної сталі у вихідному та експлуатованому станах.

Об'єкт досліджень. Випробовували сталь 17Г1С (аналог сталі API 5L X52) з двох труб (резервної та після 38 років експлуатації на магістральному газопроводі) зі смугастою феритно-перлітною структурою [4].

Рис. 1. Ударна в'язкість KCV (I) і показник чутливості до водневої крихкості HES (II) сталі 17Г1С у вихідному (1, 2) та експлуатованому (3, 4) станах, визначені на поздовжніх (1, 3) і поперечних (2, 4) зразках.

Fig. 1. Impact toughness KCV (I) and index of susceptibility to hydrogen embrittlement HES (II) of the 17H1S steel in the initial (1, 2) and operated (3, 4) states determined on longitudinal (1, 3) and transverse (2, 4) specimens.



Ступінь її експлуатаційної деградації характеризували за ударною в'язкістю KCV та чутливістю до водневої крихкості HES (за зниженням пластичності в результаті попереднього електролітичного наводнювання зразків) (рис. 1). Пара-

метр HES визначали за відносною зміною звуження ψ^H проти ψ циліндричних зразків за розтягу у повітрі після їх попереднього наводнювання і без нього, відповідно: $HES = [1 - (\psi^H / \psi)] \cdot 100\%$. Зразки наводнювали 120 h за густини струму $i = 1 \text{ mA/cm}^2$ у розчині H_2SO_4 (pH 1) з додаванням як стимулятора 10 g/l тіосечовини $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$.

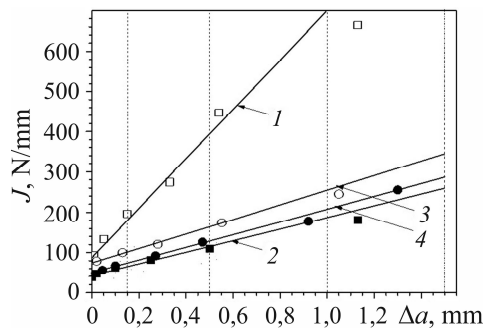
Наведені за оцінками ударної в'язкості і чутливості до водневої крихкості результати (рис. 1) узгоджуються зі загальним правилом, що крихкість металу проявляється відчутніше за випроб поперечних зразків експлуатованої сталі. Трубним сталям властиві розшарування у напрямі вальцювання, через що знижується енергоємність руйнування цих зразків. Підтвердження подібної закономірності очікували і за випроб сталей на в'язкість руйнування.

Методика та результати експериментальних досліджень в'язкості руйнування. Дотримувалися методичних настанов для її визначення методом J -інтеграла [19], який передбачає випроботи серії 5–7 зразків для кожного стану матеріалу. Використали балкові зразки розмірами $4 \times 15 \times 100 \text{ mm}$ з крайовим надрізом, від якого вирощували втомну тріщину. Загальна довжина надрізу і тріщини 9 mm. Товщину зразків 4 mm вибрали, враховуючи потребу у додаткових дослідженнях впливу катодної поляризації на в'язкість руйнування трубних сталей, які би моделювали їх наводнювання в умовах транспортування газоподібного водню. Зразки навантажували триточковим згином з реєстрацією сили та переміщення зразка в точці її прикладання, що дало можливість визначити значення J -інтеграла. Серія зразків була необхідна для їх навантаження до різного статичного підростання тріщини Δa . За результатами випроб будували залежності J – Δa , які часто подають як J – R криві. Визначали два значення J -інтеграла [19]: J_0 , яке відповідало старту тріщини від вершини втомної, та критичне $J_{0,2}$ (в'язкість руйнування) за приросту тріщини $\Delta a = 0,2 \text{ mm}$. Детальна процедура експериментів описана раніше [12]. Для мікрофрактографічних досліджень зони статичного підростання тріщини застосовували сканівний електронний мікроскоп EVO 40XVP. Враховуючи умову визначення значень J_0 і $J_{0,2}$, зосереджували увагу на аналізі ділянки Δa розміром до $\sim 0,5 \text{ mm}$, що давало можливість порівняти отримані значення в'язкості руйнування з фрактографічними ознаками механізму руйнування на мікрорівні.

Значення в'язкості руйнування сталі були як очікуваними, так і контраверсійними (див. рис. 2 і таблицю). Зокрема, очікуваним було зниження критичного значення $J_{0,2}$ сталі у вихідному стані від 215 до 72,3 N/mm за випроб поздовжніх зразків (крива 1) проти поперечних (крива 2). Подібну закономірність виявили і за показником J_0 . До неочікуваних віднесли результати, отримані за випроб, які, вірогідно, інтенсифікують мікророзшарування. Зокрема, зареєстрували лише незначне зменшення значень J_0 ($J_{0,2}$) експлуатованої сталі (криві 3, 4) за аналогічної зміни орієнтації зразків відносно напрямку вальцювання: від 75 (108) для поздовжніх до 49,8 (81,4) N/mm для поперечних, попри загальновідомий відчутніший вплив розшарувань на опір крихкому руйнуванню за випроб поперечних зразків [4, 11]. Крім того, порівнювали поперечні зразки зі сталі у вихідному та експлуатованому станах. Вплив експлуатації сталі на значення $J_{0,2}$ поперечних зразків можна вважати практично відсутнім, або навіть з незначною тенденцією до посилення (72,3 проти 81,4 N/mm для сталі у вихідному стані та після експлуатації, відповідно).

Рис. 2. Залежності $J-\Delta a$ ($J-R$ криві) сталі 17Г1С у вихідному стані (1, 2) і після експлуатації (3, 4), отримані на поздовжніх (1, 3) і поперечних (2, 4) зразках.

Fig. 2. Dependences $J-\Delta a$ ($J-R$ curves) of the 17H1S steel in the initial (1, 2) and operated (3, 4) states determined on longitudinal (1, 3) and transverse (2, 4) specimens.



Значення J -інтеграла (N/mm) сталі 17Г1С залежно від її стану та орієнтації зразків

Стан металу	Орієнтація зразків	
	поздовжні	поперечні
Вихідний	90,2 / 215	38,0 / 72,3
Експлуатований	75,0 / 108	49,8 / 81,4

Примітка: J_0 – у чисельнику та $J_{0,2}$ – у знаменнику.

Фрактографічний аналіз зламів зразків (рис. 3) виявив здебільшого в'язкий механізм руйнування. Для експлуатованої сталі переважав зсувний, тоді як для сталі у вихідному стані на ділянках перетинок між розшаруваннями формувалися найчастіше рівновісні ямки відриву. Найчіткіше це проявилось на зламах поперечних зразків, де розшарування, орієнтовані у напрямі вальцювання, перемежовувалися ділянками дрібних ямок (рис. 3с, d). Смугастих рельєф зламу експлуатованої сталі пов'язали з відшаруваннями ланцюжків неметалевих включень, орієнтованих у напрямі вальцювання, від навколишньої матриці (рис. 3d). Вважали, що такі розшарування формувалися ще під час експлуатації сталі через невідповідність модулів пружності включень та матриці. Їх виявляли здебільшого у фериті, а на ділянках між розшаруваннями переважали дрібні ямки, що утворилися на часточках цементиту в межах перлітних зерен.

Результати, отримані на зразках різної відносно напрямку вальцювання орієнтації, підтверджують важливість враховувати особливості смугастої мікроструктури трубних сталей під час оцінки їх в'язкості руйнування (рис. 4). Розшарування в напрямі поширення головної (домінантної) тріщини чіткіші на зламах поперечних зразків (рис. 3d). Під час їх активного статичного навантаження ці вторинні тріщини-розшарування поширювалися між волокнами структури вздовж осі поперечних зразків і в напрямі вальцювання, який збігався з напрямом поширення основної тріщини. Складна морфологія вершини тріщини статичного підростання, очевидно, впливає на напружений стан, який за цих умов виникає. Тому її поширення Δa є ключовим для побудови $J-R$ кривих та визначення на їх основі показників в'язкості руйнування. Орієнтація площин розшарувань, розташованих з певною періодичністю вздовж фронту магістральної тріщини, зумовлює його поділ на вузькі смуги з неушкодженого металу, що діють, як і серія зразків меншої товщини. Таким чином, зразок виглядає як ламінат, складений з багатьох тонких прошарків, які разом утворюють його переріз. Отже, розшарування розділяють фронт тріщин [12, 20]. За таких умов в'язкість руйнування може навіть збільшуватися [12, 20], оскільки на тонших зразках вона може бути вищою, ніж на товстіших. Поділ фронту тріщини та її галуження послаблює напружений стан у вершині головної тріщини [20–22], що спричиняє ріст в'язкості

руйнування. Зокрема, за випроб поперечних зразків параметр $J_{0,2}$ для експлуатованої сталі є дещо вищий (81,4 N/mm), ніж для сталі у вихідному стані (72,3 N/mm), тоді як за випроб поздовжніх – вдвічі нижчий. Подібну поведінку спостерігали для трубної сталі API 5 L X67 після 34 років експлуатації [12].

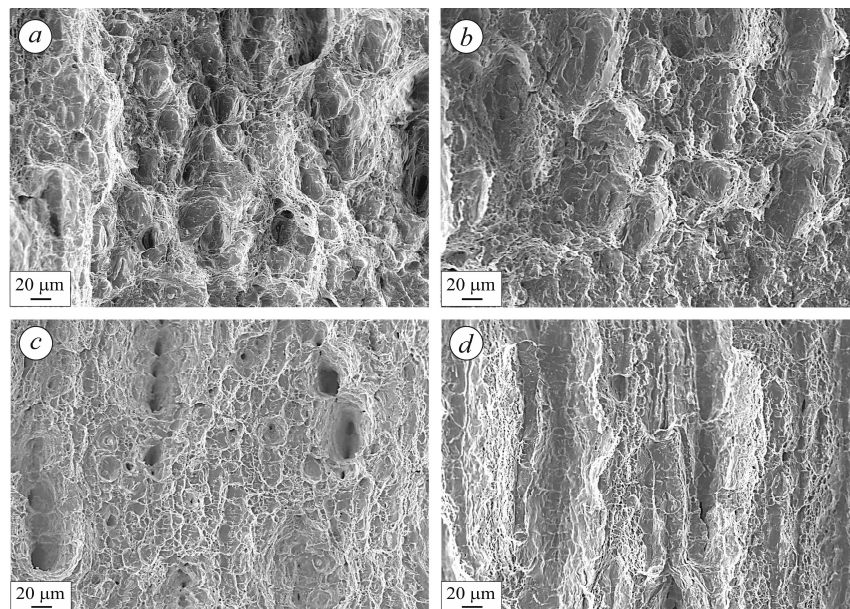


Рис. 3. Фрактограми сталі 17Г1С у вихідному стані (а, с) та після 38 років експлуатації (b, d) за випроб поздовжніх (а, b) та поперечних зразків (с, d) на в'язкість руйнування.

Fig. 3. Fractograms of the 17H1S steel in its initial state (a, c) and after 38 years of operation (b, c) under fracture toughness tests of longitudinal (a, b) and transverse specimens (c, d).

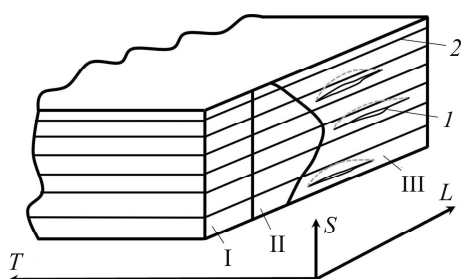


Рис. 4. Схема розвитку тріщини та розшарувань (1) у поперечному відносно текстури сталі зразку (2): I – надріз; II – зона росту втомної тріщини; III – зона статичного її росту з розшаруваннями, орієнтованими в напрямі поширення доміантної тріщини. T, S, L – поперечний, радіальний і поздовжній напрями відносно напрямку вальцювання труби.

Fig. 4. Scheme of crack propagation and delaminations (1) in a transverse specimen relative to the steel texture (2): I – notch; II – zone of fatigue crack growth; III – zone of static crack growth with delaminations oriented in the direction of the dominant crack propagation. T, S, L – transverse, short-transverse, and longitudinal directions with respect to the pipe rolling direction.

ВИСНОВКИ

За результатами оцінювання в'язкості руйнування методом J -інтеграла сталі 17Г1С зі смугастою феритно-перлітною мікроструктурою виявлено механічні та мікрофрактографічні ознаки нетипової відсутності впливу експлуатації на її опір

крихкому руйнуванню за випроб поперечних зразків з орієнтацією площини руйнування, яка спричиняє розшарування між структурними складниками та поділ фронту тріщини. До чинників, які інтенсифікують розшарування між волокнами структури, належать, насамперед, витягнуті вздовж осі труби неметалеві включення, волоконна мікроструктура сталі, її тривала експлуатація та взаємодія з наводнювальними середовищами. Ефект пояснено двоякою роллю мікророзшарування в опорі росту тріщини: зниження дефектами енергоємності руйнування за їх сприятливої орієнтації до напряду руйнування (поперечні зразки та тривала експлуатація, яка інтенсифікує дефектність); релаксація напружень через складну морфологію тріщин, пов'язану з поділом їх фронту та галуженням.

Дослідження виконано за грантової підтримки проєкту № 2022.01/0099 Національним фондом досліджень України.

1. Zhu X.-K. State-of-the-art review of fracture control technology for modern and vintage gas transmission pipelines // Eng. Fract. Mech. – 2015. – **148**. – P. 260–280. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.05.055
2. Peculiarities of the static and dynamic failure mechanism of long-term exploited gas pipeline steel / P. Maruschak, R. Bishchak, O. Prentkovskis, L. Poberezhnyi, I. Danyliuk, and G. Garbinčius // Adv. Mech. Eng. – 2016. – **8**, № 4. DOI: 10.1177/1687814016641565
3. Evaluation of hydrogen embrittlement risk of long-term operated gas pipelines made of 10G2BT steel / A. M. Syrotyuk, R. L. Leshchak, M. V. Hrynenko, and N. T. Hembara // Materials Science. – 2023. – **59**, № 3. – P. 300–305. DOI: 10.1007/s11003-024-00777-8
4. Вплив структурно-механічного стану сталі транзитного газопроводу на схильність до водневого окрихчення / О. І. Звірко, О. Т. Цирульник, Г. В. Кречковська, М. І. Греділь, Г. М. Никифорчин, О. І. Венгрінюк, І. О. Цибайло // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2024. – **60**, № 1. – С. 26–33.
5. Hredil M. I. Role of disseminated damages in operational degradation of steels of the main gas conduits // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2011. – **33**. – P. 419–426.
6. Haeseldonckx D. and D'haeseleer W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure // Int. J. Hydrogen Energy. – 2007. – **32**, № 10–11. – P. 1381–1386. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.10.018
7. Hydrogen embrittlement effect on the structural integrity of API 5L X52 steel pipeline / H. Boukourt, M. Amara, M. Hadj Meliani, O. Bouledroua, B. G. N. Muthanna, R. K. Suleiman, A. A. Sorour, and G. Pluinage // Int. J. Hydrogen Energy. – 2018. – **43**, № 42. – P. 19615–19624. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.149
8. Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network / H. Nykyforchyn, L. Unigovskyi, O. Zvirko, O. Tsyurulnyk, and H. Krechkovska // Procedia Struct. Integr. – 2021. – **33**. – P. 646–651. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.10.071
9. Pluinage G., Toth L., and Capelle J. Effects of hydrogen addition on design, maintenance and surveillance of gas networks // Processes. – 2021. – **9**, № 7. – Article number 1219. DOI: 10.3390/pr9071219
10. Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation / A. Laureys, R. Depraetere, M. Cauwels, T. Depover, S. Hertelé, and K. Verbeken // J. Nat. Gas Sci. – 2022. – **101**. – Article number 104534. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104534.
11. Evaluating hydrogen embrittlement susceptibility of operated natural gas pipeline steel intended for hydrogen service / O. Zvirko, H. Nykyforchyn, H. Krechkovska, O. Tsyurulnyk, M. Hredil, O. Venhryniuk, and I. Tsybailo // Eng. Fail. Anal. – 2024. – **163A**. – Article number 108472. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108472
12. Assessment of hydrogen embrittlement of operated pipe steel using the J-integral method / O. T. Tsyurulnyk, O. Z. Student, O. I. Zvirko, D. O. Demianchuk, and O. I. Venhryniuk // Materials Science. – 2024. – **59**, № 6. – P. 694–701. DOI: 10.1007/s11003-024-00830-6
13. Influence of hydrogen and low temperature on pipeline steels mechanical behavior / P. Fassina, F. Bolzoni, G. Fumagalli, L. Lazzari, L. Vergani, and A. Sciuccati // Procedia Eng. – 2011. – **10**. – P. 3226–3234. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.533

14. *Effect of hydrogen charging on the mechanical properties of advanced high strength steels* / T. Depover, D. Pérez Escobar, E. Wallaert, Z. Zermout, and K. Verbeken // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2014. – **39**, № 9. – P. 4647–4656. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.12.190
15. *Effect of hydrogen on fracture toughness properties of a pipeline steel under simulated sour service conditions* / E. V. Chatzidouros, A. Traidia, R. S. Devarapalli, D. I. Pantelis, T. A. Steriotis, and M. Jouiad // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2018. – **43**, № 11. – P. 5747–5759. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.186
16. *Hydrogen embrittlement evaluation of micro alloyed steels by means of J-integral curve* / M. Cabrini, E. Sinigaglia, C. Spinelli, M. Tarenzi, C. Testa, and F. M. Bolzoni // *Materials*. – 2019. – **12**. – Article number 1843. DOI: 10.3390/ma12111843
17. *Mechanical characterization of hydrogen embrittlement in a gaseous environment: An innovative test setup using sub-size specimens* / Y. Madi, L. M. Santana, S. Belkacemi, V. Farrugia, A. Meddour, P.-J. Marchais, M. Bertin, and J. Furtado // *Eng. Fail. Anal.* – 2024. – **162**. – Article number 108362. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108362
18. *Effect of long-term thermomechanical treatment on the crack resistance of 12Kh1MF steel* / O. N. Romaniv, A. N. Tkach, I. R. Dzioba, V. N. Simin'kovich, and A. A. Islamov // *Materials Science*. – 1989. – **25**, № 2. – P. 202–208. DOI: 10.1007/BF00780511
19. *Standard test method for J-integral characterization of fracture toughness*. ASTM. E 813 // *Annual Book of ASTM Standards*. – 1996. – Vol. 03.01. – P. 713–727.
20. *Venkateswara Rao K. T., Yu W., and Ritchie R. O. Cryogenic toughness of commercial aluminum-lithium alloys: Role of delamination toughening* // *Metall. Trans. A*. – 1989. – **20**. – P. 485–497. DOI: 10.1007/BF02653929
21. *Pała R. and Dzioba I. Influence of delamination on the parameters of triaxial state of stress before the front of the main crack* // *AIP Conf. Proc.* – 2018. – **2029**, № 1. – Article number 020052. DOI: 10.1063/1.5066514
22. *Pała R., Lipiec S., and Dzioba I. Influence of the steel rolling direction on the mechanical properties and distribution of the local stress in front crack* // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2018. – **461**, № 1. – Article number 012064. DOI: 10.1088/1757-899X/461/1/012064

Одержано 12.09.2024