

УДК 621.867:620.17:620.193

КОРОЗІЙНО-ЦИКЛІЧНА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ СТРІЛИ БУРТОУКЛАДНИКА

Л. К. ПОЛИЩУК¹, Г. В. ХАРЧЕНКО², О. І. ЗВІРКО³

¹ Вінницький національний технічний університет;

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено за високої асиметрії навантаження у модельному середовищі, що імітує дощові опади в промислових регіонах, кінетику корозійно-втомного росту тріщин у кутниковій сталі рами стріли буртоукладника після його тридцятилітньої експлуатації. Для матеріалу у вихідному стані не виявлено впливу корозивного середовища на швидкість росту тріщин, однак, воно інтенсивно пришвидшує руйнування в експлуатованому, особливо всередині ділянки Періса кінетичних діаграм руйнування. На припорогових їх ділянках можливе гальмування росту тріщини, що, ймовірно, пов'язано з корозійним затупленням її вершини. Встановлено, що фрактографічною ознакою експлуатаційної деградації металу конструкції є специфічні втомні борозенки на ділянці припорогового росту тріщин.

Ключові слова: профільна сталь, тривала експлуатація, корозивне середовище, втомний ріст тріщин, фрактографічний аналіз.

Ресурс елементів підіймально-транспортувальних механізмів залежить від опірності матеріалу втомному руйнуванню, тобто зародженню і поширенню втомних тріщин. З іншого боку, його тривала (десятьки років) експлуатація може спричинити суттєву деградацію вихідних фізико-механічних властивостей, які визначають роботоздатність конструкцій [1–3]. Раніше [4], порівнюючи механічні властивості сталі кутників рамної конструкції тривало експлуатованого буртоукладника з вихідним станом металу, виявили, що міцність та пластичність істотно не змінилися, однак, погіршилася ударна в'язкість металу, тобто його опірність крихкому руйнуванню. Тому можна очікувати, що експлуатаційна деградація металу повинна негативно вплинути і на опір втомному руйнуванню. Водночас підіймально-транспортувальні механізми експлуатуються за дії корозивно-агресивних атмосферних опадів, які можуть пришвидшувати їх втомне руйнування.

Нижче досліджено вплив модельного корозивного середовища типу кислого дощу на циклічну тріщиностійкість сталі стрілоподібної конструкції під час складування насипної сільськогосподарської продукції.

Особливості експериментальних методик. Досліджували сталь Ст3 кутника 45×45×5 mm рами експлуатованого 30 років буртоукладника марки БУМ-65М2Б3-К. Визначали циклічну тріщиностійкість металу з елемента рами, на який практично не діяли експлуатаційні навантаження (умовно вихідний стан), та з тієї її частини, що зазнавала максимальних розтягувальних циклічних напружень, оскільки полічка кутника мала менший момент опору проти робочого згинального моменту. Механічні властивості за розтягу та ударна в'язкість відомі [4]. Плоскі зразки розміром 4×18×140 mm деформували консольним згином на випробувальній ма-

шині з жорстким типом навантаження частотою 5 Hz у повітрі і 0,3 Hz у корозивному середовищі за асиметрії циклу $R = 0,1; 0,6$ і $0,75$. Високі значення R відтворюють умови циклічного навантаження рами стріли буртоукладника. Будували кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) у координатах розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK –швидкість росту тріщини da/dN , використовуючи методичні настанови [5]. Візуально реєстрували довжину тріщини з допомогою мікроскопа з похибкою 0,01 mm.

Корозивним середовищем слугував розчин 0,01 N NaCl, підкислений кислотою HCl до pH4, який імітує дощові опади в промислових регіонах України. Середовище подавали крапельним методом у зону концентратора напружень зразка, моделюючи так атмосферні опади. На сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP досліджували фрактографічні особливості втомних зламів, які заздалегідь очищали від продуктів корозії ультразвуковим методом.

Результати та їх обговорення. Висока пластичність сталі, мала товщина t зразків та висока асиметрія R значно обмежили діапазон розмаху КІН ΔK , для якого можна будувати кінетичні діаграми ΔK – da/dN (рис. 1). Зокрема, пластичний колапс, що змушував припиняти експерименти, наступав за максимального значення КІН $K_{\max} \sim 35 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Відповідно з підвищенням асиметрії R звужувався діапазон актуальних значень ΔK кінетичної діаграми, а за дотримання умов плоскої деформації він був ще меншим. Значення ΔK (див. таблицю), визначені за відомим емпіричним рівнянням забезпечення умов плоскої деформації $t = 2,5 (K_{\max}/\sigma_T)^2$, належать припороговій ділянці кінетичних діаграм, тому тільки порогові КІН ΔK_{th} можна вважати характеристиками сталей. Водночас, враховуючи, що товщина зразків для випробувань на циклічну тріщиностійкість відповідала практично товщині кутника, можна допустити, що і в рамній конструкції швидкість росту тріщини для цього рівня ΔK буде приблизно такою ж, як і в лабораторному зразку. Це дає можливість використовувати кінетичні діаграми для інженерних розрахунків довговічності конструкцій на стадії росту втомних тріщин (РВТ).

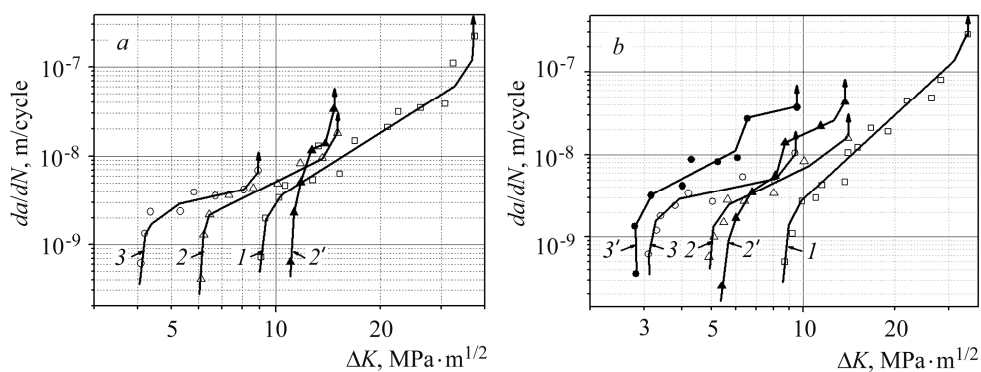


Рис. 1. КДВР сталі Ст3 у вихідному (а) та експлуатованому (б) станах для $R = 0,1$ (1); $0,6$ (2, 2') і $0,75$ (3, 3') за випроб у повітрі (1–3) і в корозивному середовищі (2', 3').

Fig. 1. Diagrams of fatigue crack growth in St3 steel in as received state (a) and after service (b) for $R = 0.1$ (1); 0.6 (2, 2') and 0.75 (3, 3') under testing in air (1–3) and in corrosion environment (2', 3').

Відмінності в кінетиці втомного руйнування сталі за різної асиметрії циклу навантаження відповідають загальним закономірностям і їх пояснюють головно зменшенням ефекту закриття втомних тріщин з підвищенням значень R . Для $R \geq 0,6$ закриття тріщин не повинно проявлятися навіть для низькоміцних сталей, тому подальше деяке зниження порога втоми ΔK_{th} за переходу асиметрії циклу

від 0,6 до 0,75 вже треба пояснювати, принаймні для вихідного стану металу, ростом розмаху деформацій в околі вершини втомної тріщини.

За $R = 0,1$ експлуатація сталі не вплинула на швидкість РВТ у повітрі. Експлуатованому металу властиве істотне збільшення ефекту закриття тріщини, спричинене зростанням шорсткості поверхні, що нівелює її потенційне пришвидшення через зниження опірності деградованого металу втомному руйнуванню [6]. Однак за високих R , коли закриття тріщин вже не визначає кінетику руйнування виявлено відмінності в швидкості da/dN , здебільш у припороговій ділянці ΔK . Їх відсутність для вищих ΔK узгоджується з усталеними уявленнями про слабку чутливість кінетики втомного росту тріщини на ділянці Періса до мікроструктурних змін у сталях [7] та їх стану впродовж тривалої експлуатації [8–10].

Корозивне середовище теж неоднозначно вплинуло на РВТ. Для вихідного стану металу (рис. 1а), якому притаманний високий опір крихкому руйнуванню [4], середовище за асиметрії $R = 0,6$ суттєво сповільнює кінетику руйнування в основному у припороговій області навантажень, через що поріг корозійної втоми ΔK_{thc} навіть перевищив поріг у повітрі ΔK_{th} за $R = 0,1$. Гальмування корозійного РВТ у пластичних сталях пояснюють проявом різних чинників: ефектом закриття тріщин навіть за високих R , корозійним затупленням гострої втомної тріщини та підвищенням опору мікропластичній деформації наводнюванням металу в околі тріщини [7, 11, 12]. Очевидно, що навіть за такої високої асиметрії навантаження може відбуватися закриття тріщини, спричинене продуктами корозії в її вістрі [8]. Що стосується можливого наводнювання металу у вершині тріщини, то в експлуатаційних умовах слід брати до уваги і наводнювальну здатність атмосферної корозії сталей [13].

Корозивне середовище в основному негативно вплинуло на ріст тріщини в експлуатаційно окрихченій сталі, за винятком припорогової ділянки кінетичної діаграми при $R = 0,6$. Кінетичній діаграмі при $R = 0,75$ властиве типове для високоміцних сталей пришвидшення росту тріщини у всьому діапазоні розмаху КІН ΔK . Таким чином, експлуатаційна деградація металу, незважаючи на збереження низької міцності, формує закономірності корозійно-втомного руйнування, притаманні неексплуатованому металу лише у високоміцному стані. Ознаки стрімкого росту швидкості da/dN за $\Delta K \sim 6$ і 8 МПа для $R = 0,75$ і $0,6$ відповідно, трактують як прояв схильності високоміцних сталей до корозійного розтріскування. Практично за таким значенням ΔK , що відповідає $K_{max} \sim 22$ МПа, можна приблизно визначити пороговий КІН K_{ISCC} , нижче якого не слід очікувати корозійно-статичного росту тріщини.

Фрактографічний аналіз експлуатованого металу засвідчив, що за випроб у повітрі припороговій ділянці КДВР властивий типовий для втоми кризьеренний мікрорельєф. До швидкості $7 \cdot 10^{-9}$ м/сусле на зламі практично домінували фестони з паралельними рядами втомних борозенок, орієнтованих перпендикулярно до магістрального напрямку поширення тріщини (рис. 2а). За подальшого зниження швидкості РВТ на ньому з'являються ділянки зі псевдоборозенками, напрямком яких змінюється від зерна до зерна (рис. 2а, зліва), що свідчить про різну кристалографічну орієнтацію в зернах. Це і відрізняє їх від класичних борозенок, розташованих перпендикулярно розвитку тріщини. У нашому випадку ділянки з таки-

Максимальні значення ΔK і K_{max} дотримання умов плоскої деформації

| Стан | $\sigma_{0,2}$, МПа | ΔK , МПа·м ^{1/2} для R | | | K_{max} , МПа·м ^{1/2} |
|----------------|----------------------|---|------|------|----------------------------------|
| | | 0,1 | 0,6 | 0,75 | |
| Вихідний | 305 | 10,98 | 4,88 | 3,05 | 12,2 |
| Експлуатований | 295 | 10,62 | 4,72 | 2,95 | 11,8 |

ми специфічними борозенками перемежуються з ділянками з класичними втомними борозенками. Подібну тенденцію зниження швидкості втомного руйнування, за якої виникають втомні борозенки, до її припорогового значення виявлено раніше для теплотривкої сталі 12Х1МФ після тривалої високотемпературної експлуатації на парогонках ТЕС [14]. Наші ж дослідження підтвердили, що навіть за кліматичних температурних умов експлуатації низьковуглецевої сталі Ст3 фрактографічною ознакою її деградації теж стають втомні борозенки, які фіксували за припорогової швидкості РВТ.

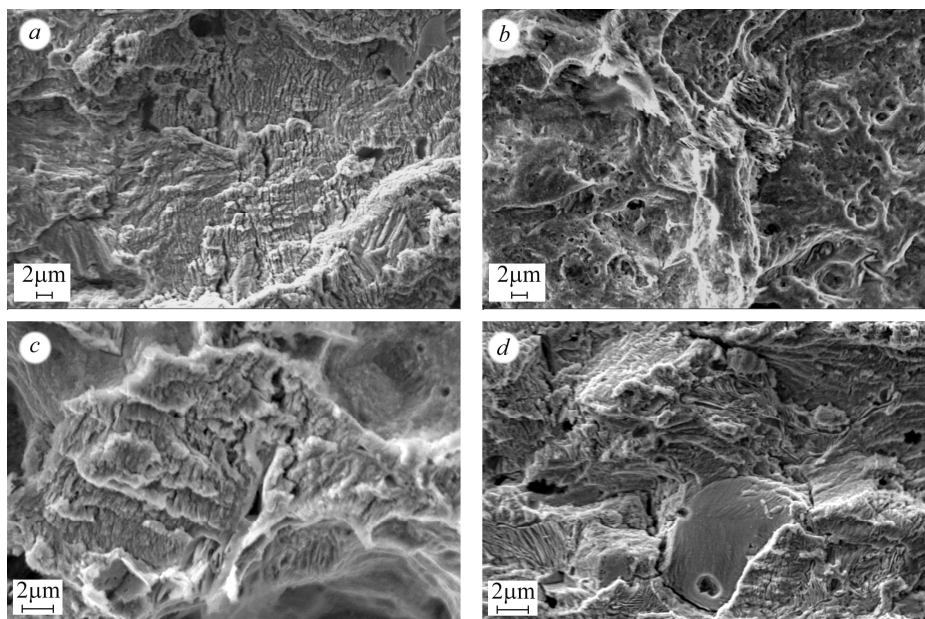


Рис. 2. Фрактографічні особливості експлуатованої сталі за випроб у повітрі (*a*) та в корозивному середовищі (*b–d*) на ділянці припорогової швидкості РВТ (*a, b*) та за швидкості 10^{-7} м/cycle (*c, d*) при $R = 0,6$.

Магістральний напрямок росту тріщини орієнтований справа наліво.

Fig. 2. Fractography features of the exploited steel tested in air (*a*) and in corrosion environment (*b–d*) near the region of threshold fatigue crack growth rate (*a, b*) and at the rate of 10^{-7} m/cycle (*c, d*) at $R = 0.6$. The main direction of fatigue crack growth is oriented from right to left.

Для фрактографічного аналізу корозійно-втомного росту тріщини використовували зразки, які попередньо випробовували за такою специфічною процедурою. Спочатку зароджували втомну тріщину у повітрі і, покроково знижуючи розмах навантаження, опускалися до швидкості РВТ $5 \cdot 10^{-9}$ м/cycle. Після цього випробувальну камеру заповнювали корозивним середовищем і продовжували експерименти за незмінного режиму навантаження. Проте неочікувано ріст тріщини призупинявся, а для його відновлення навантаження поступово збільшували, досягаючи вищого порогового рівня (його підтвердили і за умов зниження розмаху КІН). Між припороговою ділянкою росту тріщини у повітрі і її стартом в середовищі спостерігали чіткий перехід у вигляді майже паралельних гребенів, перпендикулярних напрямку поширення руйнування. Їх трактували як сліди корозійного затуплення вершини тріщини, з яким і можна пов'язати підвищення порогового рівня навантаження у середовищі (рис. 2*b*). Про корозійний механізм затуплення вершини тріщини свідчила також велика кількість фігур травлення на припороговій ділянці навантаження, які відсутні під час росту тріщини у повітрі з подальшою дією середовища на поверхню зламу. Зауважили коливання ширини зони затуплення і криволінійність її фронту по товщині зразка. Це може свідчити

про те, що не в усіх точках уздовж фронту тріщини існують однаково сприятливі умови для реалізації корозійного розчинення металу.

Фігури травлення супроводжують ріст тріщини за випроб у середовищі аж до руйнування зразка. Але їх кількість (і, відповідно, площа зламу, на якій вони домінують) та глибина поступово зменшуються зі зростанням розмаху КІН та швидкості росту тріщини. На зламі починають з'являтися типові елементи з утомними борозенками, які поступово стають переважальними на рельєфі (рис. 2с), та елементи кризьзерного руйнування з вторинним розтріскуванням уздовж меж зерен та міжфазних меж ферит–цементит у зернах перліту (рис. 2д). Зазначимо, що типовим проявом впливу середовища є ослаблення меж зерен та міжфазних меж [15], що пришвидшує ріст тріщин, а в нашому випадку спричинило зсув кінетичної діаграми в область підвищених швидкостей руйнування (див. рис. 1б).

ВИСНОВКИ

Фрактографічною ознакою експлуатаційної деградації металу кутника стріли буртоукладника є специфічні втомні борозенки, по-різному орієнтовані до напрямку росту тріщини від зерна до зерна. Корозивне середовище не впливає на кінетику втомного руйнування сталі у вихідному стані, однак, пришвидшує ріст утомних тріщин всередині ділянки Періса для експлуатованого металу, що вказує на його схильність до корозійного розтріскування. Вплив модельного середовища кислого дощу на швидкість росту втомних тріщин у припороговій області навантаження залежить від асиметрії циклу: для $R = 0,6$ все ще спостерігається гальмування росту тріщин, а для $R = 0,75$ середовище знижує поріг втоми та інтенсифікує швидкість руйнування у всьому діапазоні значень ΔK . Фрактографічні дослідження дають підстави пов'язати підвищення припорогової тріщиностійкості сталі (проти отриманої у повітрі) з затупленням вершини тріщини внаслідок корозійних процесів, активованих циклічним деформуванням металу в її околі.

РЕЗЮМЕ. Исследована при высокой асимметрии нагружения в модельной среде, имитирующей дождевые осадки в промышленных регионах, кинетика коррозионно-усталостного роста трещин в уголкового стали рамы стрелы буртоукладчика после его тридцатилетней эксплуатации. Для материала в исходном состоянии не выявлено влияния коррозионной среды на скорость роста трещин, однако, она интенсивно ускоряет разрушение в эксплуатируемом материале, особенно внутри участка Пэриса кинетических диаграмм разрушения. На припороговых их участках возможно торможение трещины, что, вероятно, связано с коррозионным затуплением ее вершины. Установлено, что фрактографическим признаком эксплуатационной деградации металла конструкции является наличие специфических усталостных бороздок на участке припорогового роста трещин.

SUMMARY. Corrosion fatigue crack growth under high loading ratio in the angle bar steel of the clamp-forming machine boom carriage after its thirty years of service in the model environment, which imitates rain precipitations in industrial regions, is investigated. The effect of corrosion environment on fatigue crack growth rate is not detected for the material in as received state but it accelerates intensively the fracture in the operated material, especially in the middle of the Paris part of the fracture kinetic diagram. The crack growth retardation is possible for their pre-threshold regions what is connected probably with corrosion crack tip blunting. It is established that existence of the specific fatigue striations in the pre-threshold crack growth region serves as the fractographical feature of in-service metal degradation of construction.

1. *Експлуатаційне* окрихчення сталі магістрального нафтопроводу / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, О. І. Звірко, Д. Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 2. – С. 125–126.
(*Tsyruľnyk O. T., Nykyforchyn H. M., Zvirko O. I., Petryna D. Yu.* Embrittlement of the steel of an oil-trunk pipeline // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 2. – P. 302–304.)
2. *Крижанівський С. І., Никифорчин Г. М.* Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Там же. – 2011. – **47**, № 2. – С. 11–20.

- (Kryzhaniv's'kyi E. I. and Nykyforchyn H. M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 2. – P. 127–136.)
3. Красовский А. Я., Лохман И. В., Орынък И. В. Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов // *Проблемы прочности*. – 2012. – № 2. – С. 23–43.
(Krasovskii A. Ya., Lohman I. V., Orynyak I. V. Stress-corrosion failures of main pipelines // *Strength of Materials*. – 2012. – **44**, № 2. P. 129–143.)
 4. Харченко Є. В., Поліщук Л. К., Звірко О. І. Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 4. – С. 77–82.
(Kharchenko E. V., Polishchuk L. K., Zvirko O. I. Estimation of the in-service degradation of steel shapes for the boom of a clamp-forming machine // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 4. – P. 501–507.)
 5. Ярема С. Я. The method for determination of crack growth rate and crack extension resistance under cyclic loading – Lviv: National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 1994. – 80 p.
 6. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості / О. М. Романів, Г. М. Никифорчин, І. Р. Дзюба та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1998. – **34**, № 1. – С. 101–104.
(Romaniv O. M., Nykyforchyn H. M., Dzioba I. R. et al. Effect of damage in service of 12Kh1MF steam-pipe steel on its crack resistance characteristics // *Materials Science*. – 1998. – **34**, № 1. – P. 110–114.)
 7. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка*. – К: Наук. думка, 1988–1990. Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. – 1990. – 680 с.
 8. Krasowsky A. Y., Dolgiy A. A., Torop V. M. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation // Proc. “Charpy Centary Conference”, Poitiers. – 2001. – **1**. – P. 489–495.
 9. Effect of ageing of steam pipeline steel on its fatigue crack growth resistance / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, B. P. Loniuk, I. R. Dzioba // Proc. Eighth Int. Conf. Mechanical Behaviour of Materials – ICM8: Progress in Mechanical Behaviour of Materials, Victoria, Canada, 1999. – Victoria: Fleming Printing Ltd., 1999. – **1**. – P. 398–403.
 10. Студент О. З., Лонюк Б. П. Ріст утомних тріщин у сталі 15Х2МФА, витриманій у високотемпературному водні // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1997. – **33**, № 4. – С. 121–126.
(Student O. Z., Loniuk B. P. Fatigue crack growth in 15Kh2MFA steel subjected to aging in high-temperature hydrogen // *Materials Science*. – 1997. – **33**, № 4. – P. 532–538.)
 11. Никифорчин Г. М. Прояв водневої та низькотемпературної крихкості в припороговій циклічній тріщиностійкості матеріалів // Там же. – 2002. – **38**, № 4. – С. 5–16.
(Nykyforchyn H. M. Manifestation of hydrogen and low-temperature brittleness in near-threshold cyclic crack resistance of materials // *Materials Science*. – 2002. – **38**, № 4. – P. 471–483.)
 12. Никифорчин Г. М., Студент О. З. Вплив водню на формування порогів утоми конструкційних сталей // Там же. – 2001. – **37**, № 2. – С. 97–106.
(Nykyforchyn H. M., Student O. Z. Influence of hydrogen of the formation of fatigue thresholds in structural steels // *Materials Science*. – 2001. – **37**, № 2. – С. 252–263.)
 13. Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process / T. Tsuru, Y. Huang, M. R. Ali et al. // *Corr. Sci.* – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440.
 14. Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on mechanical and fractographic peculiarities of fatigue crack growth / O. Z. Student, W. Dudzinski, H. M. Nykyforchyn, A. Kaminska // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1999. – **34**, № 4. – С. 49–58.
(Student O. Z., Dudzinski W., Nykyforchyn H. M., Kaminska A. Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on the mechanical and fractographic characteristics of fatigue crack growth // *Materials Science*. – 1999. – **35**, № 4. – P. 499–508.)
 15. Effect of hydrogenation on fracture mode of a reactor pressure vessel steel / N. Taylor, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyurulnyk, O. Z. Student // Там же. – 2009. – **45**, № 5. – С. 5–16.
(Taylor N., Nykyforchyn H. M., Tsyurulnyk O. T., Student O. Z. Effect of hydrogenation on the fracture mode of a reactor pressure-vessel steel // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 5. – P. 613–625.)

Одержано 11.11.2014