

УДК 621.867:620.17:620.193

## КОРОЗИЙНО-ЦИКЛІЧНА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ СТРИЛИ БУРТОУКЛАДНИКА

Г. В. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup>, Л. К. ПОЛІЩУК<sup>2</sup>, О. І. ЗВІРКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська Політехніка"

<sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет

<sup>3</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

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. Показано, що матеріалу у вихідному стані не властивий вплив корозивного середовища на швидкість росту тріщин, однак воно інтенсивно прискорює руйнування в експлуатованому матеріалі, особливо всередині ділянки Періса кінетичних діаграм руйнування. За припорогових їх ділянок можливе гальмування росту тріщини, що ймовірно пов'язано з її корозійним затупленням. Встановлено, що фрактографічною ознакою експлуатаційної деградації металу конструкції є наявність специфічних втомних борізодок на ділянці припорогового росту тріщин.

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

Ресурс елементів підіймально-транспортувальних механізмів визначається опірністю матеріалу втомному руйнуванню, тобто зародженню і поширенню втомних тріщин. З іншого боку його тривала, десятками років, експлуатація може спричинити значну деградацію вихідних фізико-механічних властивостей, які визначають роботоздатність конструкцій [1–3]. Раніше [4] порівнянням механічних властивостей сталі кутників рамної конструкції тривало експлуатованого буртоукладника з вихідним станом металу показано, що міцність та пластичність істотно не змінилися, однак погіршилася ударна в'язкість металу, тобто його опірність крихкому руйнуванню. Звідси можна очікувати, що експлуатаційна деградація металу повинна негативно відбитися і на опорі втомному руйнуванню. З іншого боку, підіймально-транспортувальні механізми експлуатуються за дії корозивно агресивних атмосферних опадів, які можуть прискорювати їх втомне руйнування.

Мета даної праці – дослідити вплив модельного корозивного середовища типу кислого дощу на циклічну тріщиностійкість сталі стрілоподібної конструкції при складуванні насипної сільськогосподарської продукції.

**Особливості експериментальних методик.** Матеріал досліджень – сталь Ст3 кутника 45x45x5 mm рами експлуатованого 30 років буртоукладника марки БУМ-65М2Б3-К. Визначали циклічну тріщиностійкість металу з елементу рами, на який практично не діяли експлуатаційні навантаження (умовно вихідний стан) та з тієї частини рамної конструкції, яка зазнавала розтягувальних циклічних напружень, а полічка стосовно робочого згинального моменту відзначалася меншим моментом опору, тому зазнавала більших напружень. Механічні властивості за розтягу та ударна в'язкість наведені в праці [4]. Плоскі зразки розміром 4x18x140 mm навантажували консольним згином на випробувальній машині з жорстким типом навантаження частотою 5 Hz на повітрі і 0,3 Hz – у корозивному середовищі за асиметрії циклу навантаження  $R$  0,1, 0,6 і 0,75. Високі значення  $R$  відбивають

умови циклічного навантаження рами стріли буртоукладника. Будували кінетичні діаграми втомного руйнування «розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $\Delta K$  – швидкість росту тріщини  $da/dN$ », використовуючи методичні настанови [5].

Вплив корозійного чинника на втомний ріст тріщини досліджували в спеціально розробленій комірці із оргскла, яка охоплювала робочу частину зразка з тріщиною. Поліровані стінки комірки давали можливість візуально реєструвати довжину тріщини з допомогою мікроскопа з точністю 0,01 мм. Корозивним середовищем слугував розчин 0,01 N NaCl, підкислений HCl до рН4, який імітує дощові опади в промислових регіонах України.

На сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP досліджували фрактографічні особливості втомних зламів. Злами, отримані в корозивному середовищі, попередньо очищали від продуктів корозії ультразвуковим методом.

**Результати експериментальних досліджень та їх обговорення.** Висока пластичність досліджуваної сталі, мала товщина  $t$  зразків та висока асиметрія  $R$  значно обмежили діапазон розмаху  $\Delta K$ , для якого можливо будувати кінетичні діаграми « $\Delta K - da/dN$ » (рис. 1). Так, 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  $R$  звужувався діапазон актуальних значень  $\Delta K$  кінетичної діаграми. Що стосується дотримання умов плоскої деформації, то він був ще меншим. Значення  $\Delta K$  (таблиця), визначені з відомого емпіричного рівняння забезпечення умов плоскої деформації  $t = 2,5 (K_{max}/\sigma_t)^2$ , належать припороговій ділянці кінетичних діаграм, тому тільки порогові КІН  $\Delta K_{th}$  можна вважати характеристиками сталей. Разом з тим, враховуючи, що товщина зразків для випробувань на циклічну тріщиностійкість відповідала практично товщині кутника, можна допустити, що і в рамній конструкції швидкість росту тріщини для даного рівня  $\Delta K$  буде приблизно такою ж, як і в лабораторному зразку. Це означає можливість використання побудованих кінетичних діаграм для інженерних розрахунків довговічності конструкцій на стадії росту втомних тріщин.

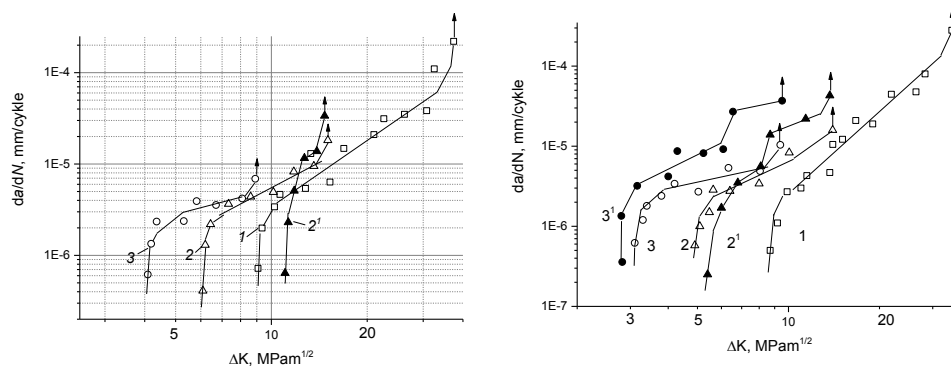


Рис. 1. Кінетичні діаграми втомного руйнування сталі Ст3 у вихідному (а) та експлуатованому (б) станах для  $R = 0,1$  (1),  $0,6$  (2, 2') і  $0,75$  (3, 3') за випроб на повітрі (1, 2, 3) і в корозивному середовищі (2', 3').

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') і  $0,75$  (3, 3') at the tests in air (1, 2, 3) and in corrosion environment (2', 3').

Таблиця. Максимальні значення  $\Delta K$  і  $K_{max}$  дотримання умов плоскої деформації:

стан	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\Delta K$ , МПа $\text{m}^{1/2}$ для $R$			$K_{max}$ , МПа $\text{m}^{1/2}$
		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

Відмінності в кінетиці втомного руйнування досліджуваної сталі для різної асиметрії циклу навантаження відповідають загальним закономірностям і пояснюються головним зменшенням ефекту закриття втомних тріщин з підвищенням  $R$ . Для  $R \geq 0,6$  закриття тріщин не повинно проявлятися навіть для низькоміцних сталей, тому подальше деяке зниження порогу втоми  $\Delta K_{th}$  при переході 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 росту втомної тріщини на повітрі. Відомо [6], що експлуатованому металу властиве істотне збільшення ефекту закриття тріщини, спричинене зростанням шорсткості поверхні, що нівелює її потенційне прискорення в результаті зниження опірності деградованого металу втомному руйнуванню. Однак за високих  $R$ , коли чинник закриття тріщин вже не визначає кінетику руйнування, отримано відмінності в  $da/dN$ , головним в припороговій ділянці  $\Delta K$ . Їх відсутність для вищих  $\Delta K$  узгоджується з усталеними уявленнями про слабку чутливість кінетики втомного росту тріщини на ділянці Періса до мікроструктурних змін в сталях [7] та зміни їх стану в результаті тривалої експлуатації [8–10].

Корозивне середовище теж неоднозначно вплинуло на втомний ріст тріщини. Для вихідного стану металу (рис. 1а), який відзначається високим опором крихкому руйнуванню [4], середовище за асиметрії  $R = 0,6$  в основному, причому істотно, сповільнює кінетику руйнування у припороговій області навантажень, в результаті поріг корозійної втоми  $\Delta K_{thc}$  навіть перевищив поріг на повітрі  $\Delta K_{th}$  при  $R = 0,1$ . Сповільнення корозійного росту втомних тріщин в пластичних сталях пояснюють проявом різних чинників: ефекту закриття тріщин навіть за високих  $R$ , корозійного затуплення гострої втомної тріщини та підвищення опору мікропластичній деформації наводнюванням металу в околі тріщини [7, 11, 12]. Очевидно, що навіть за такої високої асиметрії навантаження може проявлятися закриття тріщини, спричинене утворенням продуктів корозії в її усті [8]. Що стосується можливого наводнювання металу у вершині тріщини, то в експлуатаційних умовах слід рахуватися і з наводнювальною здатністю атмосферної корозії сталей [13].

Експлуатаційне окрихчення сталі зумовило в основному негативний вплив корозивного середовища, виключення складає лише припорогова ділянка кінетичної діаграми при  $R = 0,6$ , на якій середовище дещо заповільнює руйнування. Кінетичній діаграмі для  $R = 0,75$  властиве типове для високоміцних сталей прискорення росту тріщини у всьому діапазоні розмаху  $\Delta K$ . Таким чином, експлуатаційна деградація металу, незважаючи на збереження його низької міцності, формує закономірності корозійно-втомного руйнування, властиві для не експлуатованого металу лише у високоміцному стані. Зазначимо ознаки стрімкого росту  $da/dN$  за  $\Delta K \sim 6$  і  $8$  МПа для  $R = 0,75$  і  $0,6$  відповідно, який трактують як прояв схильності високоміцних сталей до корозійного розтріскування. Практично за таким значенням  $\Delta K$ , а це відповідає  $K_{max} \sim 22$  МПа, можна приблизно визначити порогове значення КІН корозійного розтріскування  $K_{I_{sc}}$ , нижче якого не слід очікувати корозійно-статичного росту тріщини.

Фрактографічний аналіз експлуатованого металу показав, що за випроб на повітрі припороговій ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування властивий типовий для втоми кризьзеренний мікрорельєф руйнування. До швидкості  $7 \cdot 10^{-9}$  м/сусе на зламі практично домінували фестони з паралельними рядами втомних боріздок, орієнтованих практично перпендикулярно до магістрального напрямку поширення тріщини (рис. 2а). За подальшого зниження швидкості РВТ на зламі з'являються ділянки з псевдоборізтками, орієнтація яких змінюється від зерна до зерна (рис. 2а, зліва), що відбиває різну

кристалографічну орієнтацію в зернах. Ця особливість і відрізняє їх від класичних борідок, направлених перпендикулярно розвитку тріщини. У нашому випадку ділянки з такими специфічними боріздками перемежуються ділянками з класичними втомними боріздками. Подібну тенденцію зниження швидкості втомного руйнування, за якої спостерігаються втомні борізки, до її припорогового значення виявлено раніше на теплостійкій сталі 12Х1МФ після її тривалої високотемпературної експлуатації на парогонках ТЕС [14]. Наші ж дослідження підтвердили, що навіть за кліматичних температурних умов експлуатації низько вуглецевої сталі Ст3 фрактографічною ознакою її деградації теж стають втомні борізки, які спостерігаються за припорогової швидкості РВТ.

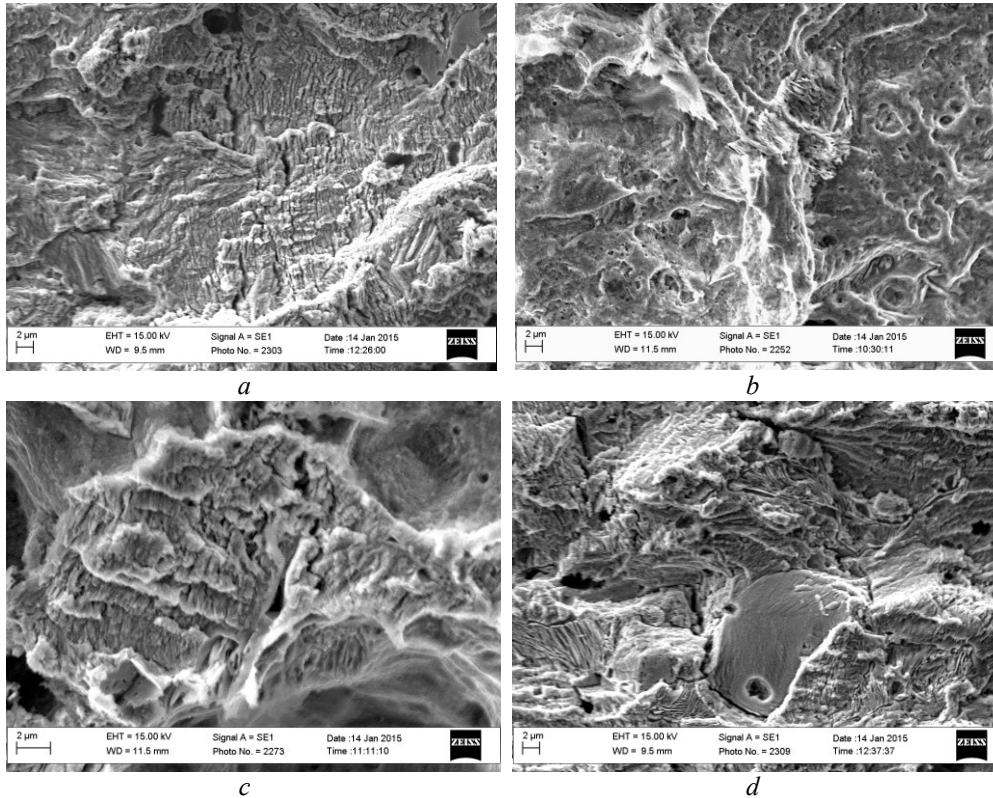


Рис. 2. Фрактографічні особливості експлуатованої сталі за випроб на повітрі (*a*) та в корозивному середовищі (*b-d*) на ділянці припорогової швидкості росту втомної тріщини (*a, b*) та за швидкості  $10^{-7}$  m/cycle (*c, d*) при  $R = 0,6$ . Магістральний напрямок росту тріщини орієнтований справа наліво.

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

Фрактографічний аналіз корозійно-втомного росту тріщини проводили на зразках зі специфічною процедурою попередніх механічних випроб. Спочатку зароджували втомну тріщину на повітрі і, покроково знижуючи розмах навантаження, опускалися до швидкості РВТ  $5 \cdot 10^{-9}$  m/cycle. Після цього випробувальну камеру заповнювали корозивним середовищем і продовжували випробування за незмінного режиму навантаження. Проте неочікувано ріст тріщини призупинився, а для його відновлення рівень навантаження поступово піднімали і тому досягали вищого порогового рівня (його підтвердили і за умов зниження

розмаху КІН). Між припороговою ділянкою росту тріщини на повітрі і стартом тріщини 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. 2b). Про корозійний механізм затуплення вершини тріщини свідчила також значна кількість фігур травлення на припороговій ділянці навантаження. В той же час вони відсутні на за росту тріщини на повітрі з подальшою дією середовища на поверхню зламу. Відзначили коливання ширини зони затуплення і криволінійність її фронту по товщині зразка. Це може бути підтвердженням того, що не в усіх точках вздовж фронту тріщини існують однаково сприятливі умови для реалізації корозійного розчинення металу.

Фігури травлення супроводжують ріст тріщини за випроб в середовищі аж до руйнування зразка. Але їх кількість (і, відповідно площа зламу, на якій вони домінують) та глибина цих ушкоджень поступово зменшуються в міру зростання розмаху КІН та швидкості росту тріщини. На зламі починають з'являтися типові елементи з утомними борідками, які поступово стають переважаючим елементом рельєфу (рис. 2c), елементи крізьзеренного руйнування з вторинним розтріскуванням вздовж меж зерен та міжфазних меж ферит-цементит в рамках зерен перліту (рис. 2d). Зазначимо, що ослаблення меж зерен та міжфазних меж під впливом середовища є типовим його проявом [15, 16] та прискорює ріст тріщин, а в нашому випадку зсунуло кінетичну діаграму в область підвищених швидкостей руйнування (див. рис. 1b).

**Висновки.** Фрактографічною ознакою експлуатаційної деградації металу кутника стріли буртоукладника слугують специфічні втомні борідки, по різному орієнтовані стосовно напрямку росту тріщини від зерна до зерна. Корозивне середовище не впливає на кінетику втомного руйнування сталі у вихідному стані, однак прискорює ріст втомних 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 і знижує поріг втоми, та інтенсифікує швидкість руйнування у всьому діапазоні  $\Delta K$ . Фрактографічні дослідження дають підстави пов'язати підвищення припорогової тріщиностійкості сталі (відносно отриманої на повітрі) з затупленням вершини тріщини внаслідок корозійних процесів, активованих циклічним деформуванням металу в її околі.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано при высокой асимметрии нагружения в модельной среде, которая имитирует дождевые осадки в промышленных регионах, кинетику коррозионно-усталостного роста трещин в угольниковой стали рамы стрелы буртоукладчика после его тридцатилетней эксплуатации. Показано, что материалу в исходном состоянии не свойственно влияние коррозионной среды, однако она интенсивно ускоряет разрушение в эксплуатируемом материале, особенно посередине участка Периса кинетических диаграмм разрушения. Для припороговых их участков возможно торможение трещины, что вероятно связано с ее коррозионным затуплением. Установлено, что фрактографическим признаком эксплуатационной деградации металла конструкции является наличие специфических бороздок на участке припорогового роста трещин.

*SUMMARY.* Corrosion fatigue crack growth under the high loading asymmetry in the model environment, which imitates rain precipitations in industrial regions, in the angle bar steel of the clamp-forming machine boom carriage after its thirty years of service is investigated. It is shown that the effect of corrosion environment on fatigue crack growth rate is not peculiar to material in as received state but it accelerates intensively a fracture in the operated material, especially in the middle of the Peris part of kinetic diagram of fracture. It is possible slowing down of crack growth for their pre-threshold part what is connected probably with corrosion

crack blunting. It was established that an existence of the specific fatigue striations on the part of pre-threshold crack growth serves as the fractographic 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. (Embrittlement of the steel of an oil-trunk pipeline / О. Т. Tsyru'nyk, Н. М. Nykyforchyn, О. І. Zvirko, D. Yu. Petryna // Materials Science. – 2004. – **40**, N 2. – P. 302–304).
2. *Крижанівський С. І., Никифорчин Г. М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**. – №2. – С. 11-20. (Kryzhanivs'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**. – N 2. – P. 127–136).
3. Красовский А.Я., Лохман И.В., Орыняк И.В. Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов // **Проблемы прочности. – 2012. – № 2. – С. 23–43.**
4. Харченко С. В., Поліщук Л. К., Звірко О.І. Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника // Фізико-хімічна 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. *Yarema S.Ya. The method for determination of crack growth rate and crack extension resistance under cyclic loading* / Yarema S.Ya. // 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. (Effect of damage in service of 12Kh1MF steam-pipe steel on its crack resistance characteristics / О. М. Romaniv, Н. М. Nykyforchyn, І. Р. Dzioba, and et al. // Materials Science. – 1998. – **34**, № 1. – P. 110–114).
7. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4 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. *Krasovsky 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. (Krasovskii, A. Ya., Lokhman, I. V., & Orynyak I. V. Stress-corrosion failures of main pipelines // Strength of Materials. - 2012, Vol. 44, №2. - P. 129-143.)
9. Effect of ageing of steam pipeline steel on its fatigue crack growth resistance / Nykyforchyn H.M., Student O.Z., Loniuk B.P., Dzioba I.R. // Proc. Eighth Int. Conf. Mechanical Behaviour of Materials - ICM8: Progress in Mechanical Behaviour of Materials, Victoria, Canada, 1999. / Eds. F. Ellyin and J.W. Provan. - Victoria: Fleming Printing Ltd., 1999. – Vol. 1: Fatigue and Fracture. – P. 398-403.
10. Ріст утомних тріщин у сталі 15Х2МФА, витриманій у високотемпературному водні / О.З. Студент, Б.П. Лонюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – **33**, № 4. – С. 121-126. (Fatigue crack growth in 15Kh2MFA steel subjected to aging in high-temperature hydrogen / O.Z. Student, B.P. Loniuk // Materials Science. – 1997. – **33**, 4. – P. 532-538.)
11. *Никифорчин Г.М. Прояв водневої та низькотемпературної крихкості в припороговій циклічній тріщиностійкості матеріалів. – // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 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. – № 4. – P. 471–483).*
12. Вплив водню на формування порогів утоми конструкційних сталей / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – **37**, № 2. – С. 97-106. (Influence of hydrogen of the formation of fatigue thresholds in structural steels / H.M. Nykyforchyn, O.Z. Student // 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. // Corrosion Science. – 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. Kamińska // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **34**, 4. – С. 49-58. (Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on the mechanical and fractographic characteristics of fatigue crack growth / O.Z. Student, W. Dudziński, H.M. Nykyforchyn, A. Kamińska // 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. Tsyru'nyk, O. Z. Student // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, 5. –

- C. 5-16. (Effect of hydrogenation on the fracture mode of a reactor pressure-vessel steel / N. Taylor, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyulnyk, O. Z. Student // Materials Science. – 2009. – **45**, 5. – P. 613-625.)
16. Effect of hydrogenation on fracture mode of a reactor pressure vessel steel / N. Taylor, H.M. Nykyforchyn, O.T. Tsyulnyk, O. Z. Student // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, 5. – C. 5-16. (Effect of hydrogenation on the fracture mode of a reactor pressure-vessel steel / N. Taylor, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyulnyk, O. Z. Student // Materials Science. – 2009. – **45**, 5. – P. 613-625.)