

УДК 539.4

МЕХАНО-ХІМІЧНИЙ МЕТОД ГАЛЬМУВАННЯ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ У МЕТАЛАХ ШТУЧНИМ ЇЇ ЗАКРИТТЯМ

М. І. ГРЕДІЛЬ¹, Є. І. КРИЖАНІВСЬКИЙ², Д. О. ДЕМ'ЯНЧУК¹,
І. П. ШТОЙКО¹, Д. П. БАРТОШЕВСЬКИЙ^{1,3}¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;³ Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено механо-хімічний метод гальмування втомної тріщини, який ґрунтується на подаванні у неї спеціального рідкого технологічного середовища на основі танінів, яке за умов фретингу призводить до інтенсивного формування в її порожнині нерозчинних танатів. Заповнюючи порожнину тріщини, ці сполуки створюють у сталях істотний ефект закриття тріщини аж до її повного гальмування в широкому діапазоні коефіцієнта інтенсивності напружень. Досліджено сплави з різною корозійною тривкістю: вуглецеву сталь 20, нержавну сталь 12Х18Н10Т та технічний титан ВТ1-0. Ефективність методу оцінювали за кінетичними діаграмами втомного росту тріщини. Підтверджено ключову роль закриття тріщини у її гальмуванні. Показано неоднакову ефективність методу для різних металевих матеріалів, що пояснено конкурентним формуванням оксидних плівок, які запобігають утворенню осадів танатів у тріщині.

Ключові слова: втома, гальмування тріщини, штучне закриття тріщини, танін.

A method based on supplying a special liquid technological environment containing tannins into the crack cavity is investigated, which leads to the intensive formation of insoluble tannates in it. Filling the crack cavity, these compounds create an essential crack closure effect in steel up to its complete arrest in a wide range of stress intensity factors. Alloys with different corrosion resistance are studied: carbon steel 20, stainless steel 12X18H10T and titanium VT1-0. The effectiveness of the method is assessed by fatigue crack growth curves. A crucial role of crack closure in its arrest is confirmed. The unequal effectiveness of the method for various metal materials is shown. This is explained by the competitive formation of oxide films which prevent the accumulation of tannate deposits in the crack.

Keywords: fatigue, crack arrest, artificial crack closure, tannin.

Вступ. Тріщиностійкість конструкційних матеріалів є важливим показником їх опору крихкому руйнуванню, про що свідчить низка недавніх досліджень [1–3]. Стадія втомного росту тріщини визначає залишкову довговічність елементів конструкцій із макродефектом за умов їх циклічного навантаження [4–10]. Тому розроблення методів її гальмування, особливо в металах, є важливим науково-технічним завданням [11–15]. Один із способів його вирішення полягає у посиленні ефекту закриття тріщини (ЗТ) [16], який зменшує механічну рушійну силу від номінального розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK до ефективного КІН ΔK_{eff} [16–20]. Це спонукало до розроблення методів штучного ЗТ [21–24], серед них – заповнення порожнини тріщини твердими дрібнодисперсними продуктами, які запобігають її змиканню впродовж півциклу розвантаження [22].

Ефективність методу залежить від спеціальних технологій подавання твердої речовини у тріщину, тобто ступеня її заповнення.

Принципово інший підхід запропоновано в працях [11, 25, 26]. Описаний метод ґрунтується на подаванні рідкого спеціального технологічного середовища (СТС) на основі танінів у втомну тріщину, яке внаслідок фретингу на її берегах забезпечує утворення зі сталями феритно-перлітного класу твердих металохелатних сполук. Вони спричиняють настільки істотне ЗТ, що ріст тріщини повністю гальмується в широкому діапазоні КІН.

Концепція використання описаного СТС для гальмування втомного росту тріщини штучним створенням ефекту ЗТ опирається на дослідження інгібіторів корозії, де основним складником є таніни. Механізм їх захисної дії пов'язують [27] із утворенням на поверхні заліза та його сплавів хемосорбційних плівок, які слугують бар'єром для проникнення активних складників корозивного середовища до металу, забезпечуючи істотний інгібіторний ефект. Зазначимо, що якщо концентрація інгібітора у водному розчині зазвичай незначна, то до СТС подібних обмежень немає. Тому тут скоріше слід орієнтуватися на розчинність таніну у воді та стабільність приготованого розчину.

Висока ефективність вказаного методу актуалізує подібні дослідження і щодо інших металів, для яких гальмування росту втомних тріщин є важливим аспектом у забезпеченні довговічності конструкцій.

Методики експериментальних досліджень. Вивчали вуглецеву сталь 20, нержавну сталь аустенітного класу 12Х18Н10Т та технічний титан ВТ1-0. Раніше [25] саме на сталі 20 продемонстрували аномально високе ЗТ та повне припинення росту втомної тріщини майже у всьому актуальному діапазоні розмаху ΔK завдяки вищенаведеному методу. Ця сталь обрана насамперед для порівняння ефективності СТС стосовно інших сплавів. Оскільки механізм захисної дії танінів полягає в утворенні металохелатних сполук як бар'єрних плівок, дослідили інші метали, які відрізняються від вуглецевої сталі високою корозійною тривкістю завдяки формуванню на їх поверхні захисних оксидних плівок.

Швидкість росту втомної тріщини визначали консольним згином балкових зразків розміром 10×20×160 mm із крайовим надрізом за практично віднульового циклу частотою 10 Hz для експериментів на повітрі та 1 Hz за дії СТС. Періодично, після певної кількості циклів N , оптичним методом реєстрували приріст тріщини a на бокових поверхнях зразка. За результатами обчислень розмаху КІН та швидкості росту тріщини будували кінетичні діаграми втомного росту тріщини $\Delta K - da / dN$.

Для оцінювання впливу СТС на швидкість da / dN використовували плоску відкриту посудину, виготовлену з інертного матеріалу, яку кріпили до верхньої частини зразка (від концентратора). Вона має отвір на дні, через який рідину подають у порожнину тріщини. Посудину заповнювали СТС з концентрацією таніну 20 g/l. Під час циклічного навантаження рідке середовище легко проникало у тріщину завдяки капілярному ефекту. Витікання рідини із вершини тріщини свідчило про її цілковите заповнення.

Під час зупинок циклічного навантаження реєстрували ЗТ методом податливості. Для цього на бокових поверхнях зразків попередньо висвердлили два ряди неглибоких отворів по обидва боки від потенційної траєкторії росту тріщини, віддалі між рядами становила ~ 4 mm. В отвори вставляли голки тензометричного давача переміщення, на основі замірів будували діаграми "сила F на динамометрі випробувальної установки (або КІН K)—переміщення голок давача δ ". Діаграма складається з двох прямолінійних ділянок та округлої проміжної частини. Точка перетину дотичних до прямолінійних частин діаграми $F - \delta$ ($K - \delta$) роз-

межувала повний розмах ΔK на закрити ΔK_{cl} та відкрити (ефективну) ΔK_{eff} ділянки. За значенням ΔK_{cl} оцінювали вплив СТС на ЗТ.

Результати та їх обговорення. Зазначимо, що зазвичай істотні значення ΔK_{cl} порівняно з ΔK_{eff} характерні лише для припорогової ділянки діаграми $\Delta K - da/dN$, якщо не брати до уваги штучне створення ЗТ. Тому ефективність описаного методу гальмування тріщин аналізували, розглядаючи середню прямо-лінійну ділянку (ділянку Періса) втомної діаграми (рис. 1, криві 1).

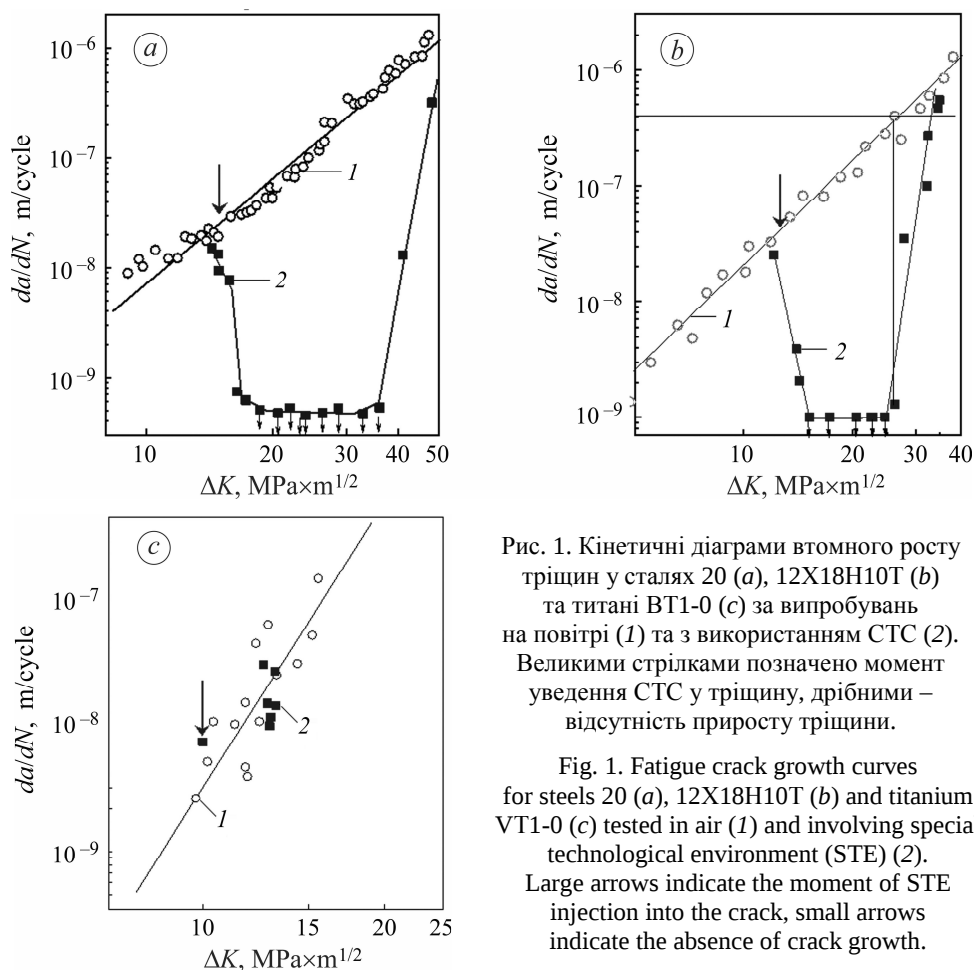


Рис. 1. Кінетичні діаграми втомного росту тріщин у сталях 20 (а), 12Х18Н10Т (b) та титані ВТ1-0 (с) за випробувань на повітрі (1) та з використанням СТС (2). Великими стрілками позначено момент уведення СТС у тріщину, дрібними – відсутність приросту тріщини.

Fig. 1. Fatigue crack growth curves for steels 20 (a), 12X18H10T (b) and titanium VT1-0 (c) tested in air (1) and involving special technological environment (STE) (2). Large arrows indicate the moment of STE injection into the crack, small arrows indicate the absence of crack growth.

Зазначимо, що СТС подавали в тріщину за певного рівня ΔK , який характеризував початок ділянки Періса та відповідав швидкості $da/dN \approx 10^{-8}$ m/cycle для всіх досліджуваних металів. Оскільки за таких умов для сталей спостерігали гальмування тріщин аж до повної їх зупинки (дрібні стрілки на рис. 1а, b), то можна стверджувати, що за нижчих значень ΔK метод гарантовано забезпечуватиме зупинку руйнування. Таким чином, повне гальмування тріщини властиве діапазону ΔK від порогового значення розмаху КІН ΔK_{th} до певного його значення, яке залежить від класу сталі.

Встановили, що гальмувальний вплив СТС на ріст втомної тріщини менший для нержавної сталі порівняно з вуглецевою. Для кожної з них визначили дві критичні точки на діаграмі $\Delta K - da/dN$ за показником ΔK : перша ΔK_1 характеризує старт тріщини після її повного гальмування, тоді як друга ΔK_2 – рівень

КІН, вище якого повністю нівелюється вплив СТС на кінетику росту тріщини (див. таблицю). Інформативною є також швидкість $(da/dN)'$, за якої втрачається ефект СТС. З аналізу результатів випливає, що нержавна сталь аустенітного класу поступається вуглецевій феритно-перлітній сталі за всіма показниками. Зокрема, значення ΔK_1 , яке вказує на діаграмі на обмеження опору росту тріщини за дії СТС, становить $32 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для вуглецевої сталі проти $24 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для нержавної, а показник ΔK_2 – на втрату ефективності СТС, відповідно 47 та $33 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Крім того, встановлено, що нержавній сталі для збереження гальмувального ефекту СТС необхідна менша швидкість росту тріщини.

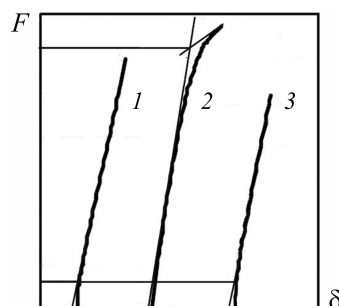
Діаграми $F-\delta$ (рис. 2), побудовані для прямолінійної ділянки $\Delta K-da/dN$, вказують на ЗТ як причину її гальмування після введення СТС. Зафіксовано повну зупинку тріщини для сталей, спричинену аномально високим ступенем ЗТ (рис. 2, крива 2), при цьому ефективна частина циклу навантаження ΔK_{eff} близька до порогового значення ΔK_{th} . Стосовно титану, відсутність позитивного впливу СТС на кінетику його втомного руйнування відповідає незмінності оцінок ЗТ без та за дії розчину (рис. 2, крива 3).

Реперні показники на діаграмах $\Delta K-da/dN$

Сталь	ΔK_1	ΔK_2	$(da/dN)',$ m/cycle
	МПа·м ^{1/2}		
20	32	47	$1 \cdot 10^{-6}$
12X18H10T	24	33	$5 \cdot 10^{-7}$

Рис. 2. Типові діаграми $F-\delta$ для оцінювання ефекту ЗТ у досліджених матеріалах без (1) та з подачею СТС (2, 3) за випроб сталей (1, 2) та титану (3).

Fig. 2. Typical $F-\delta$ diagrams for assessing the crack closure effect in the investigated alloys without (1) and with STE supply (2, 3) during tests of steels (1, 2) and titanium (3).



Виявлені відмінності в ефективності методу створення штучного ЗТ для сталей різного класу слід пояснювати з єдиних позицій корозійної взаємодії сплаву на основі заліза з розчином таніну у порожнині втомної тріщини. Штучне ЗТ є результатом аномального заповнення порожнини тріщини, принаймні поблизу її вершини, твердими продуктами взаємодії середовища з металом. За впливу на сталь СТС із високим вмістом таніну проявляється конкурентне формування на поверхні сталі металохелатної та оксидної плівок. Із отриманих результатів очевидно, що на вуглецевій сталі переважає утворення металохелатних продуктів. Саме на цьому ефекті ґрунтується дія перетворювачів іржі [28].

Зазначимо, що втомний ріст тріщини часто супроводжується фретингом, внаслідок якого тверді продукти взаємодії нагромаджуються у порожнині тріщини, що й забезпечує ефективність СТС на основі танінів для повного гальмування тріщини. Таким чином, є два основні чинники створення ефекту ЗТ за допомогою запропонованого ТС: формування металохелатних плівок та фретинг-процес, послаблення яких знижуватиме ефективність методу.

Як відомо, основа корозійної тривкості нержавних сталей є у швидкому формуванні тонкої оксидної плівки на їх поверхні. Під час застосування СТС утворення оксидів конкурує і, очевидно, переважає над формуванням металохелатних плівок за розмаху КІН, вищого за $\sim 25 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Водночас фретинг-корозія на

берегах втомної тріщини в нержавних сталях не призводить до відчутного ефекту ЗТ, принаймні в діапазоні розмаху КІН, де спостерігали гальмівний вплив СТС.

Для титану не виявлено гальмівної дії СТС на ріст утомної тріщини навіть за низької швидкості ($\sim 10^{-8}$ m/cycle), для якої зафіксували повну її зупинку в обох сталях. Зазначимо, що на титані та його сплавах теж можливе формування металохелатних плівок, що є передумовою для істотного ефекту ЗТ. Однак відомо, що швидкість пасиваційних процесів на них особливо висока – вища, ніж на нержавних сталях. Тому можна обґрунтовано допустити, що для титану за описаних умов випроб переважає формування тонкої оксидної плівки, що унеможливорює нагромадження в порожнині тріщини значного об'єму твердих продуктів взаємодії таніну з металом, а отже, і створення штучного ЗТ.

ВИСНОВКИ

Доведено застосовність методу штучного створення ЗТ для гальмування росту втомної тріщини у нержавних сталях, який ґрунтується на подаванні в її порожнину технологічного середовища (водного розчину таніну), що призводить до повної зупинки тріщини в широкому діапазоні розмаху КІН. Механізм формування ЗТ полягає у її заповненні твердими нерозчинними продуктами взаємодії свіжоутвореної поверхні з таніном як активним складником СТС. Ефективність методу неоднакова для різних за корозійною тривкістю металів. Зокрема, гальмування тріщини у нержавній аустенітній сталі 12Х18Н10Т менш ефективно порівняно із вуглецевою сталлю 20, що спричинено конкурентним формуванням захисних оксидних плівок на нержавній сталі, які зменшують прояв штучного ЗТ. Відсутність впливу СТС на втомний ріст тріщини у титані ВТ1-0 пояснили його надзвичайно високою пасиваційною здатністю, що забезпечує перевагу у формуванні захисних оксидних плівок над іншими можливими продуктами взаємодії. Таким чином, запорукою ефективності методу штучного створення ЗТ з використанням розчину таніну вважали утворення саме танатів заліза.

1. *Evaluation of the stress-strain state at the crack tip in casing pipes based on numerical simulation* / O. I. Zvirko, S. Lipeć, O. I. Vengreniuk, and I. Dzioba // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 4. – P. 460–465. DOI: 10.1007/s11003-023-00685-3
2. *Оцінювання водневої крихкості експлуатованої трубної сталі методом J-інтеграла* / О. Т. Цирульник, О. З. Студент, О. І. Звірко, Д. О. Демянчук, О. І. Венгрінюк // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2023. – **59**, № 6. – С. 48–54.
3. *Development of a method for controlled hydrogen fragmentation of medium-carbon steels to reduce their crack resistance* / V. R. Skalskyi, I. M. Dmytrakh, O. T. Tsyryl'nyk, A. M. Syrotyuk, and O. I. Zvirko // *Strength Mater.* – 2024. DOI: 10.1007/s11223-024-00600-4
4. *Polishchuk L. K., Kharchenko H. V., and Zvirko O. I. Corrosion-fatigue crack-growth resistance of steel of the boom of a clamp-forming machine* // *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 2. – P. 229–234. DOI: 10.1007/s11003-015-9834-8
5. *Yadzhak N., Andreykiv O., and Dolinska I. Computational models for mode II and mode III small fatigue crack growth in structural elements* // *Archive of Appl. Mech.* – 2022. – **92**, № 4. – P. 1273–1286. DOI: 10.1007/s00419-022-02104-6
6. *Fatigue lifetime analysis of a bicycle frame made by additive manufacturing technology from AlSi10Mg* / M. Margetin, V. Chmelko, M. Sulko, R. Ďurka, and T. Koščo // *Metals*. – 2022. – **12**, № 8. DOI: 10.3390/met12081277
7. *Zvirko O., Venhryniuk O., and Nykyforchyn H. The effect of long-term operation on fatigue and corrosion fatigue crack growth in structural steels* // *Procedia Structural Integrity*. – 2023. – **51**. – P. 24–29. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.10.062
8. *Peculiarities of fatigue crack growth in steel 17H1S after long-term operations on a gas pipeline* / V. Vira, H. Krechkovska, V. Kulyk, Z. Duriagina, O. Student, B. Vasylyv, V. Cherkas, and T. Loskutova // *Materials*. – 2023. – **16**, № 8. – P. 2964. DOI: 10.3390/ma16082964
9. *Fatigue crack growth in operated gas pipeline steels* / M. Hredil, H. Krechkovska, O. Tsyryl'nyk, and O. Student // *Procedia Structural Integrity*. – 2020. – **26**. – P. 409–416. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.06.052

10. *Peculiarities of fatigue fracture of high-alloyed heat-resistant steel after its operation in steam turbine rotor blades* / H. Krechkovska, M. Hredil, O. Student, I. Tsybailo, and P. Solovei // *Int. J. Fatigue*. – 2023. – **167**. – Article number 107341. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107341
11. *Venhrynyuk T. P. Fatigue crack retardation by the application of repair coatings to gas pipelines under pressure* // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 6. – P. 739–742. DOI: 10.1007/s11003-013-9562-x
12. *Analysis of the deceleration methods of fatigue crack growth rates under mode I loading type in pearlitic rail steel* / G. Lesiuk, H. Nykyforchyn, O. Zvirko, R. Mech., B. Babiarchuk, S. Duda, J.-M. De Arrabida Farello, and J. A. F. O. Correia // *Metals*. – 2021. – **11**, № 4. – P. 1–13. DOI: 10.3390/met11040584
13. *Cernescu A. The influence of crack tip shielding on fatigue crack propagation* // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2017. – **41**. – P. 307–313. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.41.41
14. *Brown E. N., White S. R., and Sottos N. R. Retardation and repair of fatigue cracks in a microscale toughened epoxy composite – Part I: Manual infiltration* // *Composite Sci. and Technol.* – 2005. – **65**, № 15–16. – P. 2466–2473. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.04.020
15. *Borges M. F., Neto D. M., and Antunes F. V. Revisiting classical issues of fatigue crack growth using a non-linear approach* // *Materials*. – 2020. – **13**, № 23. – P. 5544.
16. *Elber W. The significance of fatigue crack closure* // *ASTM STP*. – 1971. – **486**. – P. 230–242.
17. *Romaniv O. N., Nikiforchin G. N., and Andrusiv B. N. Effect of crack closure and evaluation of the cyclic crack resistance of constructional alloys* // *Soviet Materials Science*. – 1983. – **19**, № 3. – P. 212–225.
18. *Kinetics of fatigue crack growth and crack closure effect in long term operating steel manufactured at the turn of the 19th and 20th centuries* / G. Lesiuk, M. Szata, J. A. Correia, A. M. P. De Jesus, and F. Berto // *Eng. Fract. Mech.* – 2017. – **185**. – P. 160–174. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.044
19. *Pippin R. and Hohenwarte A. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena* // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2017. – **40**, № 4. – P. 471–495. DOI: 10.1111/ffe.12578
20. *On 50 years of fatigue crack closure dispute* / D. Kujawski, A.K. Vasudevan, R. E. Ricker, and K. Sadananda // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2023. – **46**, № 8. – P. 2816–2829. DOI: 10.1111/ffe.14034
21. *Song P. S., Hwang S., and Shin C. S. Effect of artificial closure materials on crack growth retardation* // *Eng. Fract. Mech.* – 1998. – **60**, № 1. – P. 47–58. DOI: 10.1016/S0013-7944(97)00180-X
22. *Shin C. S., Huang K. C., and Li R. Z. Artificial retardation of fatigue crack growth by the infiltration of cracks by foreign materials* // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1998. – **21**, № 7. – P. 835–846. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1998.00068.x
23. *Feng M., Ding F., and Jiang Y. A study of crack growth retardation due to artificially induced crack surface contact* // *Int. J. Fatigue*. – 2005. – **27**, № 10–12. – P. 1319–1327. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.06.019
24. *Karamloo M., Mazloom M., and Ghasemi A. An overview of different retrofitting methods for arresting cracks in steel structures* // *Structural Monitoring and Maintenance*. – 2019. – **6**, № 4. – P. 291–315. DOI: 10.12989/smm.2019.6.4.291
25. *Effective method for fatigue crack arrest in structural steels based on artificial creation of crack closure effect* / Y. Khaburskyi, Z. Slobodyan, M. Hredil, and H. Nykyforchyn // *Int. J. Fatigue*. – 2019. – **127**. – P. 217–221. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.001
26. *Elevation of the fatigue strength of pump rods as a result of treatment with a special medium* / B. V. Kopei, O. I. Zvirko, T. P. Venhrynyuk, Z. V. Slobodyan, and I. P. Shtoiko // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 1. – P. 125–131. DOI: 10.1007/s11003-020-00406-0
27. *Compositions based on the extracts of oak bark and chips as corrosion inhibitors for medium-carbon steels in water* / Z. V. Slobodyan, L. A. Mahlatyuk, R. B. Kupovych, and Y. M. Khaburskyi // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 5. – P. 687–697. DOI: 10.1007/s11003-015-9773-4
28. *Patent US3753924A. Rust inhibitor containing tannins with a chelation catalyst and cross-linking agent*. – Publ. 21.08.1973.

Одержано 15.02.2024