

УДК 821.894+620.17

## ВПЛИВ РЕЖИМІВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ НА ФРЕТИНГ-ВТОМУ СТАЛІ 40Х

П. В. КАПЛУН, В. А. ГОНЧАР

*Хмельницький національний університет*

Подано результати експериментальних досліджень на фретинг-втому зі згином сталі 40Х після іонного азотування у безводневих та водневих середовищах. Визначено оптимальний режим іонного азотування у безводневому середовищі за критерієм максимальної довговічності сталі 40Х за фретинг-втомом та вплив водню на неї після азотування у водневому середовищі.

**Ключові слова:** *фретинг-втомом зі згином, іонне азотування, довговічність, безводневе середовище, водневе середовище.*

**Вступ.** У техніці велика кількість деталей, вузлів та механізмів працюють за фретингу, фретинг-втомом та корозійної фретинг-втомом. Дослідженням їх довговічності за цих умов присвячено багато праць [1–16]. Такі процеси виникають у місцях контакту деталей, в яких поверхні здійснюють коливальні відносні переміщення з малою амплітудою під дією циклічного навантаження в різних середовищах. Поверхневі пошкодження і мікротріщини, які з'являються за фретингу, відіграють роль зародків втомних тріщин, через зростання яких втомне руйнування відбувається за таких навантажень, які б за інших умов не викликали руйнування [5–8, 15]. Фретинг-втомом – дуже небезпечний і підступний вид руйнування, оскільки фретинг переважно відбувається в місцях з'єднань, недоступних для спостереження, і призводить до передчасного або навіть несподіваного (раптового) катастрофічного втомного руйнування [13, 14]. Корозивне середовище прискорює цей процес [1, 5–11, 14, 15]. Підвищення довговічності деталей, які працюють за цих умов, має велике значення для народного господарства.

На довговічність конструкційних елементів за фретинг-втомом впливає безліч чинників, які залежать від конструкції деталі, властивостей матеріалу, навантаження, середовища тощо [5–9, 15]. При описі механізмів руйнування дослідники фретинг-втомом висувають різні гіпотези, віддаючи перевагу тим чи іншим чинникам, які часто бувають суперечливими і не дають об'єктивного пояснення явищам, що відбуваються. Так, немає чіткого уявлення, який чинник важливіший – хімічний чи механічний. Вважають [6, 9, 12], що на повітрі переважаючим є механічний чинник, а інші [7, 14, 15, 17–21] надають великого значення хімічному (впливу середовища). Автори праці [9] вважають, що вплив фретингу на втомну міцність найбільше проявляється через утворення поверхневих тріщин безпосередньо під час циклічного контактного тертя, а не через каверни і знос, корозію або ерозію.

На сьогодні існує багато методів для підвищення фретинг-втомної міцності конструкційних елементів, класифікація яких наведена раніше [6] і які можна розділити на дві групи: конструкційні і технологічні. Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є модифікація поверхні застосуванням про-

---

*Контактна особа:* П. В. КАПЛУН, e-mail: kaplunpavel@gmail.com

гресивних технологій: лазерного зміцнення [3], електроіскрового легування [4], методів хіміко-термічної обробки [5, 14, 15], пічного азотування [7], іонного азотування в безводневих середовищах [2, 16–18]. Це дає змогу в багато разів збільшити довговічність конструктивних елементів за фретинг-втоми в різних середовищах.

Мета випробувань – визначити вплив режимів іонного азотування в безводневих середовищах на фретинг-втому зі згином та виконати порівняльну оцінку фретинг-втоми зразків, зміцнених іонним азотуванням в безводневому та водневому середовищах.

**Метод досліджень.** Досліджували зразки зі сталі 40Х (рис. 1) за іонного азотування в безводневих за різними режимами (табл. 1) та водневих середовищах (табл. 2). Випробовували на повітрі з використанням типової машини УКІ-10М, призначеної для випробувань на втому за консольного згину зі застосуванням спеціального пристрою. Зразок 1 закріплювали конічною частиною в контрзразок 2 гайками 5. У конічному з'єднанні створювали певний натяг за допомогою динамометричного ключа. Контрзразок 2 з'єднували з тримачем 3, який кріпився в цанговому патроні установки УКІ-10М і обертався. Навантажувальний пристрій 4 створював напруження згину в зразку з максимальним значенням у точці А, які викликали мікропереміщення в конічному з'єднанні. За обертання зразка і дії навантаження  $Q$  у конічному з'єднанні матеріалу виникає фретинг-втома.

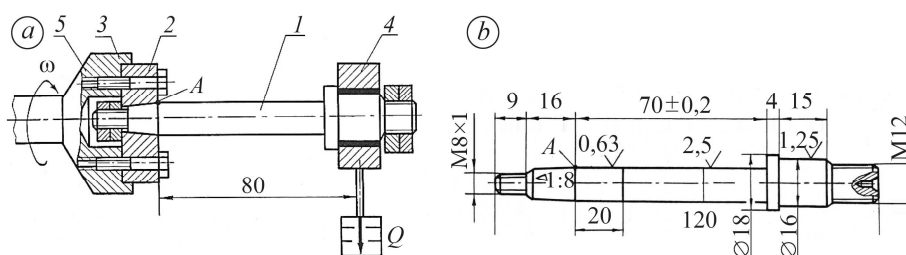


Рис. 1. Схема випробувань на фретинг-втому (а) та зразка (б): 1 – зразок, 2 – контрзразок, 3 – тримач, 4 – навантажувальний пристрій, 5 – гайки.

Fig. 1. A chart of fretting fatigue test (a) and a sample (b): 1 – sample, 2 – opposite sample, 3 – holder, 4 – load device, 5 – screw.

Критерієм оцінки фретинг-втоми є кількість циклів навантаження до руйнування зразка. За базову прийнято кількість циклів навантаження зразка з неазотованої сталі 40Х, який вставляли в контрзразок 2 зі сталі 35Л. Випробовували на повітрі за частоти обертання зразка  $6000 \text{ min}^{-1}$ , навантаження  $Q = 392 \text{ N}$ , моменту затягування гайки кріплення зразка  $20 \dots 25 \text{ N}\cdot\text{m}$ , максимального напруження згину  $210 \text{ MPa}$ . Биття зразка в місці прикладання навантаження –  $0,05 \dots 0,15 \text{ mm}$ , його контролювали індикатором.

Оцінювали похибку під час випробувань за методикою [22] на підставі результатів попередніх випробувань зразків зі сталі 40Х без азотування. Відносна похибка у визначенні міцності зразків не перевищувала 10%. Середнє значення довговічності неазотованих зразків, отриманої після семиразових випробувань, становило  $1,23 \cdot 10^6 \text{ cycles}$ .

Щоб зменшити кількість експериментів і вплив технологічних параметрів іонного азотування на довговічність зразків, під час випробувань на фретинг-втому застосували метод планування експериментів (чотирифакторний план Хартлі) [23].

**Результати досліджень та їх обговорення.** Наведені результати (табл. 1) експериментальних досліджень сталі 40Х на фретинг-втому після іонного азоту-

вання в безводневих середовищах за різними режимами. На їх основі одержана залежність довговічності зразків (кількість циклів навантаження  $N$  до руйнування) за фретинг-втоми від технологічних параметрів азотування, яке описуємо рівнянням регресії другого порядку:

$$\begin{aligned} \lg N(\text{cycles}) = & 7,14 - 0,786x_1 + 1,278x_2 + 1,434x_3 - 0,278x_4 - \\ & -2,466x_1^2 - 1,26x_2^2 - 2,16x_3^2 - 1,482x_4^2 + 1,872x_1x_2 + 1,068x_1x_3 - \\ & -0,451x_1x_4 - 0,418x_2x_3 - 0,169x_2x_4 + 1,254x_3x_4, \end{aligned}$$

де  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – незалежні змінні величини (чинники), які описують вплив технологічних параметрів: температури, тиску, тривалості дифузійного насичення, вмісту аргону ( $C_{Ar}$ ) в середовищі насичення відповідно.

Як бачимо, режими іонного азотування мають великий вплив на довговічність сталі за фретинг-втоми, яка змінюється в широких межах від  $1,6 \cdot 10^6$  (режим 7) до  $20 \cdot 10^6$  (режим 12) циклів навантаження.

**Таблиця 1. Результати випробувань на фретинг-втому зразків сталі 40X, азотованих за різними режимами в безводневому середовищі**

№ режиму азотування	Технологічні параметри іонного азотування				Фретинг-втома, $N \cdot 10^6$ , cycles
	$T$ , °C	$P$ , Pa	$\tau$ , min	$C_{Ar}$ , %	
1	570	320	185	57	9,8
2	510	320	185	57	10,1
3	570	160	185	19	4,5
4	510	160	185	19	8,0
5	570	320	75	19	6,5
6	510	320	75	19	8,5
7	570	160	75	57	1,6
8	510	160	75	57	5,1
9	480	240	130	38	8,5
10	600	240	130	38	7,0
11	540	80	130	38	7,5
12	540	400	130	38	20,0
13	540	240	20	38	5,0
14	540	240	240	38	15,0
15	540	240	130	0	12,5
16	540	240	130	76	10,1
17	540	240	130	38	14,5
Неазотований					1,23

На основі вищенаведеного рівняння побудовані (рис. 2) залежності довговічності зразків зі сталі 40X від технологічних параметрів іонного азотування в безводневих середовищах. З графіків видно, що кожний з параметрів має суттєвий вплив на довговічність за фретинг-втоми та існують оптимальні області технологічних параметрів, за яких вона досягає максимальних значень. Використо-

вуючи рівняння регресії, графічні залежності величин (рис. 2) і розрахунки на електронно-обчислювальній машині, визначили оптимальний режим іонного азотування ( $T = 540^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 320 \text{ Pa}$ ;  $\tau = 150 \text{ min}$ ; середовище 62 vol.%  $\text{N}_2 + 38 \text{ vol.}\% \text{ Ar}$ ). Він забезпечує максимальну довговічність зразків за випробувань на фретинг-втому ( $N = 26,8 \cdot 10^6 \text{ cycles}$ ), що перевищує в 20 разів довговічність неазотованих зразків. При цьому азотований шар завтовшки 260  $\mu\text{m}$ , а товщина нітридної зони 4  $\mu\text{m}$ , мікротвердість поверхні 7230 МПа і фазовий склад поверхневого шару 25%  $\epsilon + 60\% \gamma + 15\% \alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$ .

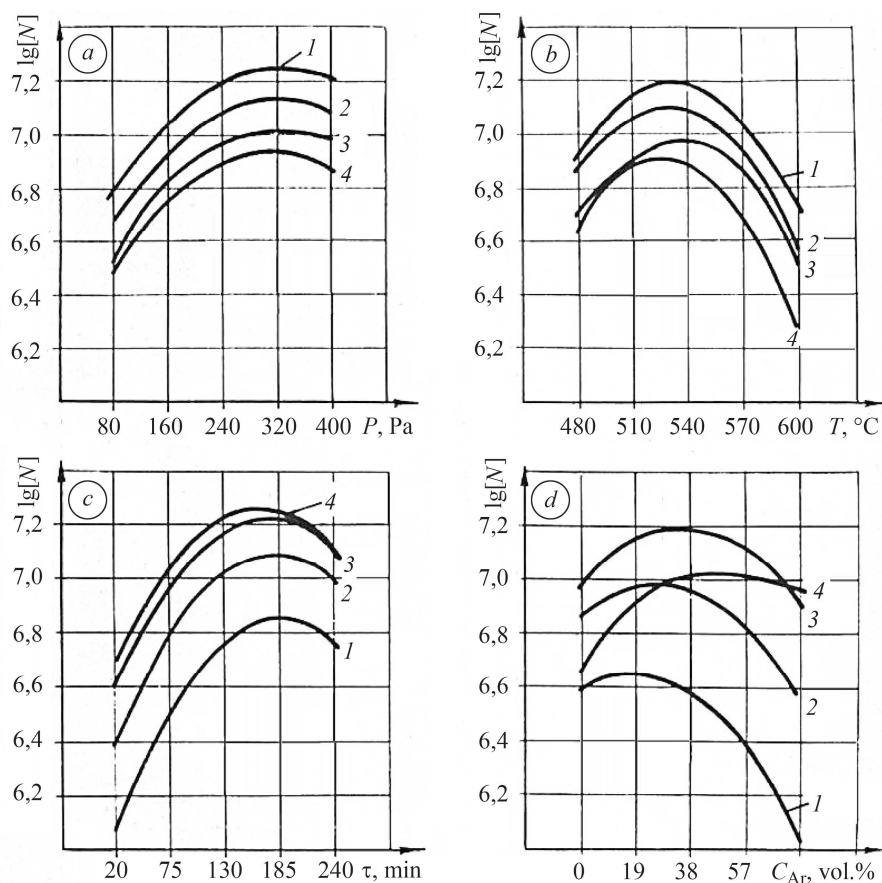


Рис. 2. Залежність довговічності сталі 40X за випробувань на фретинг-втому від технологічних параметрів іонного азотування в безводневих середовищах:

- a –  $T = 540^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau = 130 \text{ min}$ ;  $C_{\text{Ar}} = 38 \text{ vol.}\%$  (1); 57 (2); 0 (3); 76 (4);
- b –  $P = 240 \text{ Pa}$ ,  $\tau = 130 \text{ min}$ ,  $C_{\text{Ar}} = 38 \text{ vol.}\%$  (1); 57 (2); 0 (3); 76 (4);
- c –  $T = 540^{\circ}\text{C}$ ,  $C_{\text{Ar}} = 38 \text{ vol.}\%$ ,  $P = 80 \text{ Pa}$  (1), 160 (2), 240 (3), 320 (4);
- d –  $T = 540^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 130 \text{ Pa}$ ,  $\tau = 20 \text{ min}$  (1), 75 (2), 130 (3), 240 (4).

Fig. 2. Dependence of 40KH steel endurance under fretting-fatigue testing on technological parameters of the process of ion nitriding in hydrogen-free environment:

- a –  $T = 540^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau = 130 \text{ min}$ ;  $C_{\text{Ar}} = 38 \text{ vol.}\%$  (1); 57 (2); 0 (3); 76 (4);
- b –  $P = 240 \text{ Pa}$ ,  $\tau = 130 \text{ min}$ ,  $C_{\text{Ar}} = 38 \text{ vol.}\%$  (1); 57 (2); 0 (3); 76 (4);
- c –  $T = 540^{\circ}\text{C}$ ,  $C_{\text{Ar}} = 38 \text{ vol.}\%$ ,  $P = 80 \text{ Pa}$  (1), 160 (2), 240 (3), 320 (4);
- d –  $T = 540^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 130 \text{ Pa}$ ,  $\tau = 20 \text{ min}$  (1), 75 (2), 130 (3), 240 (4).

На рис. 3 наведені графіки залежності довговічності зразків сталі 40X за фретинг-втому від технологічних параметрів іонного азотування за оптимального режиму дифузійного насичення. Відхилення технологічних параметрів азотуван-

ня у той чи інший бік від оптимальних значень призводить до зменшення довговічності сталі.

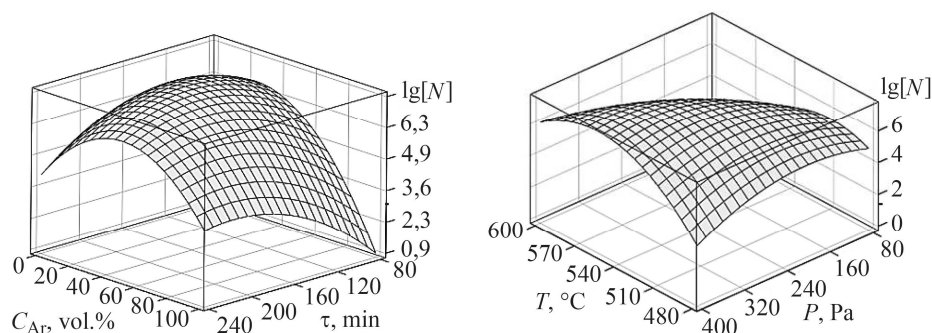


Рис. 3. Залежність довговічності азотованих зразків сталі 40X під час випробувань на фретинг-втому від технологічних параметрів іонного азотування за оптимального режиму дифузійного насичення.

Fig. 3. Dependence of endurance of the 40KH steel nitrated samples under fretting-fatigue testing on technological parameters of the process of ion nitriding in optimum conditions of diffusion saturation.

Щоб визначити вплив водню на довговічність сталі 40X за фретинг-втоми, виконали порівняльні випробування зразків після іонного азотування у водневому середовищі за режимами, в яких змінювали вміст водню в середовищі насичення, а інші параметри були аналогічними оптимальному режиму азотування в безводневому середовищі (табл. 2).

**Таблиця 2. Результати випробувань на фретинг-втому сталі 40X після іонного азотування у водневих середовищах**

№ режиму	Середовище дифузійного насичення	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Pa}$	$\tau, \text{min}$	Фретинг-втома $N \cdot 10^6, \text{cycles}$
1	90 vol.% $\text{N}_2$ + 10 vol.% $\text{H}_2$	540	320	150	24,23
2	75 vol.% $\text{N}_2$ + 25 vol.% $\text{H}_2$	540	320	150	20,61
3	62 vol.% $\text{N}_2$ + 38 vol.% $\text{H}_2$	540	320	150	17,15
4	43 vol.% $\text{N}_2$ + 57 vol.% $\text{H}_2$	540	320	150	13,44
5	25 vol.% $\text{N}_2$ + 75 vol.% $\text{H}_2$	540	320	150	10,05
Неазотований					1,23

Результати випробувань (табл. 2) показують, що за іонного азотування вміст водню у водневому середовищі має суттєвий вплив на фретинг-втому сталі. За вмісту водню в середовищі насичення до 10 vol.% він незначний і не перевищує 1%, а за концентрацій водню  $> 10 \text{ vol.}\%$  його негативний вплив на втомну міцність металу збільшується [17]. Фретинг-втомна витривалість сталі 40X після іонного азотування за режимом 5 (концентрація водню в середовищі насичення 75 vol.%) в 2,5 разів менша порівняно з її значенням за режиму азотування 1 (концентрація водню в середовищі насичення 10 vol.%). Порівняння фретинг-втомної витривалості за режимом 5 з її значенням за оптимального режиму азотування в безводневому середовищі показує, що заміна аргону на водень за всіх інших однакових параметрів азотування призводить до зменшення довговічності сталі на 62%. Причинами цього є водневе окрихчення металу та велика кількість

твердої і крихкої  $\epsilon$ -фази на поверхні, утворення якої стимулюється воднем під час іонного азотування. Мікро- та рентгеноструктурними дослідженнями встановлено, що фазовий склад поверхні азотованого шару за режимом 5 містив 80%  $\epsilon$  + 20%  $\gamma$  і мікротвердість становила 9240 МПа, тоді як за аналогічного режиму в безводневому середовищі фазовий склад поверхні 25%  $\epsilon$  + 60%  $\gamma$  + 15%  $\alpha$ -Fe<sub>[N]</sub>, а мікротвердість 7230 МПа.

### ВИСНОВКИ

Результати порівняльних експериментальних досліджень на фреттинг-втому сталі 40X на повітрі за різними режимами іонного азотування в безводневих середовищах показали, що ця технологія є ефективним способом підвищення її довговічності, яку можна змінювати в широких межах. Визначені оптимальний режим іонного азотування за критерієм максимальної довговічності сталі 40X за фреттинг-втому та вплив водню на неї після іонного азотування сталі у водневих середовищах.

*РЕЗЮМЕ.* Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований на фреттинг-усталость стали 40X на воздухе после ионного азотирования в водородных и безводородных средах. Определены оптимальный режим ионного азотирования в безводородных средах по критерию максимальной долговечности стали 40X при фреттинг-усталости и влияние водорода на нее после азотирования в водородных средах.

*SUMMARY.* The results of comparative experimental studies on the fretting-fatigue of 40X steel in air after ion nitriding in hydrogen and hydrogen-free media under various conditions are presented. The optimal mode of ion nitriding in hydrogen-free environments is determined by the criterion of maximum durability of 40X steel under fretting-fatigue and the effect of hydrogen on it after nitriding in hydrogen media.

1. Костогриз С. Г., Шалапко Ю. І., Ганзюк А. Л. Теоретичні аспекти використання легкоплавких сплавів для пригнічення фреттинг-корозії // Вісник Технологічного університету Поділля. – 1998. – № 4, Ч. 2. – С. 80–83.
2. Кузьменко А. Г., Каплун П. В., Шалапко Ю. І. Фреттинг-усталость стали 45X с диффузионными покрытиями // Проблемы трибологии. – 2000. – № 2. – С. 16–20.
3. Shalarko Y. I. and Kaplun V. G. Fretting-wear of constructional steel 1045 after laser modification of surface // Applied Mechanics and Engng. – 2002. – Vol. 7. – P. 425–431.
4. Шалапко Ю. І., Каплун В. Г., Гончар В. А. Лазерная обработка электроискровых покрытий для обеспечения фреттингостойкости // Вестник двигателестроения. – 2002. – № 1. – С. 135–140.
5. Шевеля В. В., Калда Г. С. Фреттинг-усталость металлов. – Хмельницький: Поділля, 1998. – 299 с.
6. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия металлов. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.
7. Похмурский В. И. Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения. – К.: Наук. думка, 1974. – 186 с.
8. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
9. Филимонов Г. Н., Балацкий Л. Т. Фреттинг в соединениях судовых деталей. – Л.: Судостроение, 1973. – 296 с.
10. Петухов А. Н., Балашов Б. Ф. Методы повышения усталостной прочности деталей в условиях фреттинг-коррозии // Вестник машиностроения. – 1974. – № 6. – С. 17–19.
11. Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
12. О механическом факторе при фреттинг-коррозии / Н. Л. Голего, В. П. Оноприенко, М. Н. Рожков, А. Л. Гайдаренко // Трение и износ. – 1983. – 4, № 4. – С. 581–585.
13. Кулагин Н. С., Духота А. И., Свечников В. Л. Фрактографические особенности и диагностические признаки усталостных изломов, инициированных фреттингом // Перспективные методы восстановления деталей и узлов авиационной техники. – К.: КИИГА, 1989. – С. 24–28.
14. Духота А. И., Киндрачук М. В., Лабунец В. Ф. Влияние фреттинг-коррозии на усталостную прочность титановых сплавов // Праці 13-го міжнародного колоквиуму

- “Механічна втома металів” MBM-2006 (25–28 вересня 2006 р.). – ТДТУ, 2006. – С. 243–250.
15. *Похмурський В. І., Хома М. С.* Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
  16. *Каплун В. Г., Каплун П. В.* Ионное азотирование в безводородных средах. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – 344 с.
  17. *Каплун П. В.* Вплив водню на іонне азотування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 6. – С. 68–72.  
(*Kaplun P. V.* Influence of hydrogen on the ion nitriding of steels // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 6. – P. 818–822.)
  18. *Каплун П. В., Гончар В. А.* Малоциклова втома сталей після іонного азотування у зневоднених середовищах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 3. – С. 95–98.  
(*Kaplun P. V. and Gonchar V. A.* Low-cycle fatigue of steels after ion nitriding in hydrogen-free atmospheres // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 3. – P. 402–406.)
  19. *Федірко В. М., Погрелюк І. М.* Азотування титану та його сплавів. – К.: Наук. думка, 1996. – 221 с.
  20. *Балицький О. І., Мочульський В. М., Іваськевич Л. М.* Оцінювання впливу водню на механічні характеристики складнолегованого нікелевого сплаву // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 4. – С. 91–100.  
(*Balyts'kyi O. I., Mochul's'kyi V. M., and Ivas'kevych L. M.* Evaluation of the influence of hydrogen on the mechanical characteristics of complexly alloyed nickel alloys // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 4. – P. 538–547.)
  21. *Роль водню в кавітаційному руйнуванні сталі 45 у змащувальних середовищах / О. І. Балицький, Я. Хмель, П. Краузе, Я. Некраш, М. Мацьонг // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – 45, № 5. – С. 39–42.*  
(*Role of hydrogen in the cavitation fracture of 45 steel in lubricating media / O. I. Balyts'kyi, J. Chmiel, P. Krause, J. Niekrasz, M. Maciag // Materials Science*. – 2009. – **45**, № 5. – P. 651–654.)
  22. *Прокопенко А. В., Торгов В. Н.* Методика испытаний компрессорных лопаток ГТД на усталость в коррозионной среде // Проблемы прочности. – 1980. – № 4. – С. 107–109.
  23. *Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф.* Планирование эксперимента. – Минск: Изд. БГУ, 1982. – 302 с.

Одержано 12.06.2018