

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

**ФІЗИКО-ХІМІЧНА  
МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ**

---

---

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ  
МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

---

---

**PHYSICOCHEMICAL  
MECHANICS OF MATERIALS**

---

---

Міжнародний науково-технічний журнал  
Заснований у січні 1965 року  
Виходить 6 разів у рік  
том 55, № 1, 2019  
січень – лютий  
ЛЬВІВ

## ЗМІСТ

<i>Пріхна Т. О., Подгурська В. Я., Остап О. П., Василів Б. Д., Свердун В. Б., Карпець М. В., Сербенюк Т. Б.</i> Вплив технології отримання композитів на основі МАХ-фаз титану на зношування в контакті з міддю. Ч. 2. Одностадійна технологія.....	7
<i>Басараба Ю. Б., Засадний Т. М., Луцишин Т. І., Марчук І. Є.</i> Вплив високоенергетичного помелу у водні на структурно-фазовий стан сплавів на основі фаз Лавеса .....	14
<i>Бойчишин Л. М., Хруцик Х. І., Ковбуз М. О., Герцик О. М., Гула Т. Г.</i> Особливості переходу аморфних сплавів $Al_{87}P3M_5Ni_8(Fe)$ у кристалічний стан внаслідок температурного впливу .....	21
<i>Губенко С. І.</i> Трансформація неметалевих включень у сталях за високотемпературного нагріву .....	30
<i>Бабак В. П., Щенетов В. В., Гладкий Я. Н., Супрун Т. Т., Бись С. С.</i> Структурна регенерація покривів під час тертя .....	35
<i>Лукашевич А.</i> Температурне поле у зоні контакту під час ротаційного зварювання металів тертям .....	41
<i>Vinas J., Brezina J., Brezina J., Maruschak P. O.</i> Структура та механічні властивості лазерних зварних з'єднань сталевих пластин з цинковими покривами.....	47
<i>Коломісць В. В., Антощенков Р. В., Рідний Р. В., Богданович С. А., Фабричникова І. А.</i> Оптимізація процесу оброблювання неоднорідних наплавлених деталей тракторів.....	52
<i>Огородніков В. А., Архипова Т. Ф.</i> Прогнозування механічних властивостей металів після холодного оброблення тиском.....	61
<i>Гуцаленко Ю. Г., Севидова О. К., Степанова І. І.</i> Вплив режимів плазмоелектролітного оксидування на діелектричні властивості покривів на сплаві Д16Т .....	66
<i>Паращук Л. Я., Атаманюк В. В., Смичок В. Д.</i> Розроблення складу комплексного розширеного додатку та його вплив на міцність бетону .....	72
<i>Дацишин О. П., Глазов А. Ю., Ленковський Т. М.</i> Оцінювання контактної довговічності сталі 65Г за критерієм відшарування .....	80
<i>Шопа Т. В.</i> Поперечні коливання ортотропної пластини з множиною включень довільної конфігурації з різними типами з'єднань з матрицею .....	89
<i>Гарматій Г. Ю., Попович В. С., Круль М.</i> Вплив термочутливості матеріалу на неусталений тепловий стан багаточислової пластини .....	98
<i>Кирилова О. І., Михаськів В. В.</i> Гармонічні коливання та резонансні ефекти за поздовжнього зсуву порожнистого пружного циліндра з тріщиною.....	105
<i>Стасюк Б. М., Крет Н. В., Звірко О. І., Штойко І. П.</i> Аналіз напруженого стану труби газопроводу з макродефектом, ініційованим воднем .....	113
<i>Васильєв Г. С.</i> Адаптація методу поляризаційного опору для визначення швидкості корозії за утворення важкорозчинних залізооксидних осадів .....	119
<i>Стечишин М. С., Скиба М. Є., Сухенко Ю. Г., Цепенюк М. І.</i> Втомна міцність азотованих сталей у корозивно-активних середовищах харчових виробництв.....	125

## У НАУКОВИХ КОЛАХ

<i>Куриляк Д. Б.</i> Проблеми технічної діагностики та дистанційного зондування .....	130
<i>Лук'яненко О. Г.</i> Проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів .....	132
<i>Рацька Н. Б.</i> Корозія. Захист металів від корозії .....	134
<i>Франкевич Л. Ф.</i> Захист дисертацій .....	137
<i>Греділь М. І.</i> Шоста міжнародна конференція "Механіка руйнування матеріалів і цілісність конструкцій" (FMSI 2019).....	143

## НАШІ ВТРАТИ

Пам'яті Ігоря Івановича Василенка .....	144
---	-----

## ВТОМНА МІЦНІСТЬ АЗОТОВАНИХ СТАЛЕЙ У КОРОЗИВНО-АКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

М. С. СТЕЧИШИН<sup>1</sup>, М. С. СКІПКА<sup>1</sup>, Ю. П. СУХЕНКО<sup>2</sup>, М. І. ЦЕНЕШОК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Інженерно-технологічний факультет, Львівський національний університет*

<sup>2</sup> *Національний університет біоресурсів і аграрної інженерії України, Київ*

<sup>3</sup> *Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

Досліджено вплив режимів азотування в тліючому розряді на мало- і багатоциклову витривалість конструкторських сталей у кислих, лужних, нейтральних модельних середовищах і на повітрі.

**Ключові слова:** азотування в тліючому розряді, мало- і багатоциклова витривалість, корозійно-механічне зношування, корозивно-активні середовища.

**Вступ.** Втомно-електрохімічне руйнування металів за корозійно-механічного зношування (КМЗ) у корозивно-активних середовищах (КАС) харчових виробництв [1] передбачає дослідження втомих характеристик металів. Однак їх практично не вивчали, що заважає розробці науково-обґрунтованих рекомендацій для вибору вузлів тертя технологічного обладнання харчової промисловості.

Мета роботи – дослідити вплив режимів азотування в тліючому розряді (АТР) на втомих витривалість і міцність азотованих конструкторських сталей у корозивно-активних модельних середовищах харчових виробництв.

**Методи дослідження.** АТР здійснювали на установці УАТР-1, сконструйованій і виготовленій на дослідно-експериментальній базі Подільського науково-технологічного центру Хмельницького національного університету [2]. Установа УАТР-1 – діодного типу, працює на постійному струмі у безводневих газових середовищах. Вона додатково укомплектована витривалісними елементами, розташованими в газорозрядній камері, що дає можливість доволеньо змінювати напруження і густина струму [3].

Для дослідження малоциклової довговічності використовували розроблену в Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України модернізовану установку ІІІ-2 [4], яка дозволяє випробовувати плоскі зразки чистим згином за жорсткою схемою навантаження. Досліджували за пружно-пластичного деформування згином з частотою  $0,38 \text{ s}^{-1}$ . Багатоциклову довговічність вивчали на вібростенді з електромагнетним збудженням ВЭДС-200 за консольного згину зразка в резонансі за першою формою коливань [5].

Згідно з працею [5], за втомих випробування в КАС розклинювальна дія оксидів несуттєво впливає на тріщини розміром  $> 2,5 \text{ mm}$ , а на ранніх стадіях росту тріщини – навпаки. Тому за досягнення тріщиною довжини  $0,5 \text{ mm}$  випробування припиняли. За базу випробування на повітрі прийнято  $10^7$ , а в КАС –  $5 \cdot 10^7$  cycles навантажень. Вплив зміцнення на циклічну довговічність визначали на зразках з концентраторами напружень, які варіювали до азотування.

Ступінь впливу дифузійних покривів на довговічність деталей тісно пов'язана з їх міцнісними властивостями. Міцність азотованих зразків випробовували на установці "АІА-ТОО" типу ПМАІІ-20-75. Независість навантаження –  $1,5\%$  від

прикладеного навантаження, що забезпечувало середню швидкість деформації  $3,3 \cdot 10^{-6}$  m/s при похибці швидкості переміщення утримувача зразка 1%. Тимчасовий опір визначали за найбільшим навантаженням, що передуює руйнуванню зразка.

Досліджували сталі 20, 45, 40X, 38ХМЮА за допомогою металографічного, електронно-мікроскопічного, рентгеноструктурного аналізів. Випробовували на втомну витривалість у буферних водних розчинах, які моделюють більшість робочих середовищ харчових виробництв: нейтральному (конденсат випарних апаратів), кислому (двозаміщений фосфорнокислий натрій  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  – 10 g/l, лимонна кислота  $\text{C}_2\text{H}_8\text{O}_7$  – 5 g/l) і лужному (оксид кальцію  $\text{CaO}$  – 250 g/l та цукроза – 15% від маси  $\text{CaO}$ ).

**Результати та їх обговорення.** Дослідження малоциклової довговічності азотованих сталей показали (табл. 1), що найбільше на неї впливає температура азотування: з її збільшенням малоциклова довговічність знижується. Випробування на статичну міцність показали, що АТР сталей 20, 45 і 38ХМЮА призводить до деякого підвищення, а для сталі 40X – до незначного пониження характеристик статичної міцності. Водночас суттєво знижується пластичність досліджуваних сталей, що викликано підвищенням твердості поверхневого шару внаслідок АТР (табл. 2). Встановлено (табл. 1), що в азотованих сталях з підвищенням міцності серцевини зростає границя витривалості. Оскільки під час азотування осередки руйнування містяться зазвичай під поверхневим шаром, склад нітридної зони несуттєво впливає на втомні характеристики, а збільшення опору малоциклової деформації визначають, в основному, характеристики міцності серцевини. Однак важливим чинником поліпшення втомної витривалості є товщина дифузійного шару, із зменшенням якої [6] за одночасного росту міцності серцевини кількість циклів до руйнування за малоциклового навантаження збільшується.

**Таблиця 1. Малоциклова довговічність за пружно-пластичного деформування зразків ( $\epsilon = 0,75\%$ ) у кислому середовищі залежно від режимів АТР**

Сталь	Кількість циклів $N$ до руйнування										
	Температура, К *			Вміст азоту, % **					Тиск, Па ***		
	793	833	873	45	60	75	90	100	80	265	450
38ХМЮА	3190	2485	2030	2412	2415	2460	2458	2485	2400	2460	2450
40X	3150	2390	1690	2400	2405	2430	2395	2398	2386	2430	2427
45	2840	2620	2480	2630	2620	2640	2642	2620	2600	2640	2630
20	2700	2540	2410	2510	2520	2540	2550	2540	2520	2540	2540

\* 100%  $\text{N}_2$ , 265 Па; \*\* 833 К, 265 Па; \*\*\* 833 К, 75%  $\text{N}_2$  + 25%  $\text{Ar}$ .

**Таблиця 2. Механічні властивості сталей**

Сталь	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$A$ , $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$
38ХМЮА	880 / 950	1050 / 1200	9 / 5	40 / 20	85 / 50
40X	840 / 830	1000 / 1000	10 / 6	50 / 25	90 / 50
45	340 / 450	580 / 670	15 / 10	40 / 30	70 / 60
20	230 / 330	390 / 500	20 / 15	55 / 40	65 / 60

**Примітка:** чисельник – поліпшена сталь; знаменник – азотована (833 К, 75%  $\text{N}_2$  + 25%  $\text{Ar}$ , 265 Па).

Застосування методу активного планування експерименту дало змогу отримати статистичну модель малоциклової довговічності сталі 40X у кислому середовищі ( $\epsilon = 0,5\%$ ):



$$Y = 4,90 - 0,20x_1 + 0,03x_2 + 0,03x_3, \quad (1)$$

де  $x_1$  – температура АТР;  $x_2$  – вміст азоту в газовій суміші;  $x_3$  – її тиск.

Аналіз отриманої моделі показує, що найбільший статистичний вплив на малоциклову довговічність має температура азотування, з її підвищенням довговічність зразків зменшується. Збільшення вмісту азоту в газовій суміші та її тиску, навпаки, несуттєво, але підвищує втомну витривалість сталей 45, 40X за малоциклового навантаження (рис. 1).

Рис. 1. Залежність кількості циклів до руйнування зразків за малоциклового навантаження ( $\epsilon = 0,75\%$ ) у кислому середовищі від температури (1, 2) та вмісту азоту (3, 4) за АТР: 1, 3 – сталь 40X; 2, 4 – сталь 45.

Fig. 1. Dependence of a number of cycles to the samples fracture at low cyclic loading ( $\epsilon = 0.75\%$ ) in the acidic environment on temperature (1, 2) and nitrogen content (3, 4) under discharge mode oxidizing: 1, 3 – 40X steel; 2, 4 – 45 steel.

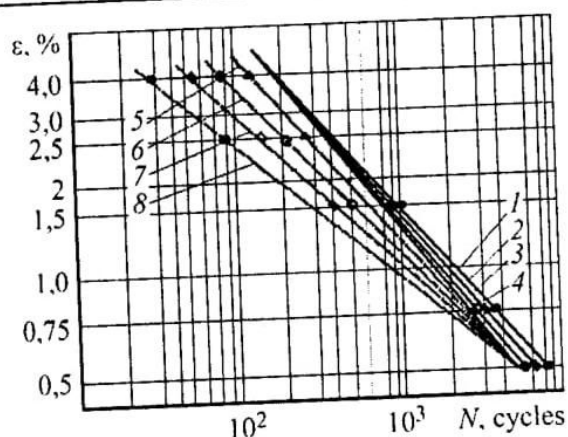
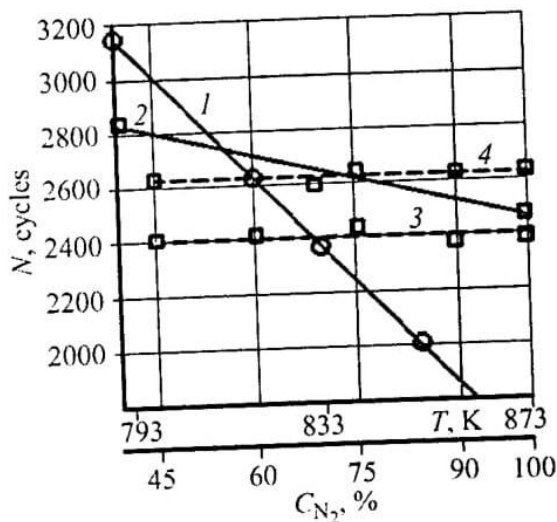


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Опір малоцикловому навантаженню незміцнених (1–4) і азотованих (833 К, 75%  $N_2$  + 25% Ar, 265 Па) (5–8) сталей 40X (1, 8); 38ХМЮА (2, 7); 45 (3, 5) і 20 (4, 6) у кислому модельному середовищі.

Fig. 2. Resistance to small-cycle load of unstabilized (1–4) and nitrided (833 K, 75%  $N_2$  + 25% Ar, 265 Pa) (5–8) steels 40X (1, 8); 38ХМЮА (2, 7); 45 (3, 5) and 20 (4, 6) in an acidic model environment.

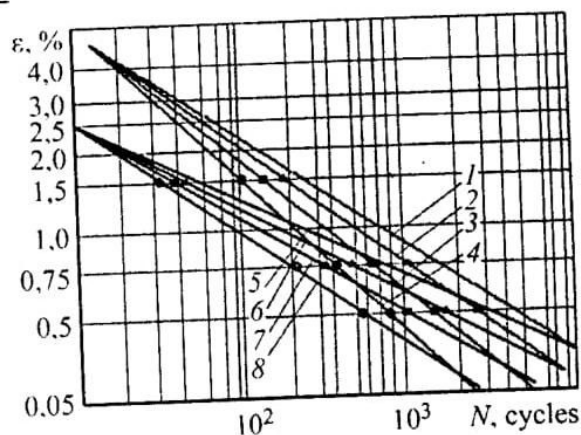


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Опір малоцикловому навантаженню поліпшеної (1–4) і азотованої (833 К, 75%  $N_2$  + 25% Ar, 265 Па) сталі 40X (5–8) у середовищах: 1, 5 – лужному; 2, 6 – на повітрі; 3, 7 – нейтральному (конденсат випарних апаратів з рН 7); 4, 8 – кислому (рН 6,5).

Fig. 3. Resistance to small-cycle loading of improved (1–4) and nitrided (833 K, 75%  $N_2$  + 25% Ar, 265 Pa) steel 40X (5–8) in the media: 1, 5 – alkaline; 2, 6 – air; 3, 7 – neutral (condensate of evaporation apparatus with pH 7); 4, 8 – acid (pH 6.5).

Встановлено, що зі збільшенням амплітуди деформації різниця у довговічності незміцнених сталей зменшується і практично зникає при  $\epsilon \geq 3\%$ . Очевидно, що її дія сильніша за вплив структури та характеристик міцності досліджених сталей. При цьому сталь із більшою питомою роботою деформації  $A$  (табл. 2) має вищу втомну витривалість за малоциклового навантаження (рис. 2, криві 1 і 4). Як бачи-

мо (рис. 2 і 3), АТР неефективне для усіх середовищ при  $\epsilon > 0,25\%$ . За малоциклового навантаження загальною закономірністю є зниження довговічності сталей зі зменшенням їх пластичності. Тому АТР, знижуючи пластичність (табл. 2), зменшує кількість циклів навантаження до руйнування. При цьому, що міцніша азотована сталь, то швидше знижується її довговічність у кислому середовищі. Останнє пояснюється збільшенням зсуву потенціалу у від'ємну сторону за вищих напружень деформації, які у міцніших сталей завжди більші. Результатом цього є прискорення корозійних процесів і водневе окрихчення у вершинах тріщин.

Дослідженнями встановлено (рис. 3), що кількість циклів до руйнування за малоциклового навантаження азотованих і незміцнених сталей у лужному середовищі більша, ніж на повітрі, в конденсаті випарних апаратів і кислому середовищі. Підвищення малоциклової втомної витривалості в лужному середовищі порівняно з витривалістю на повітрі пояснюється утворенням гідрооксидного шару на поверхні зразків, що утруднює доступ кисню в зону деформації і блокує вихід дислокацій на поверхню.

Втомна витривалість у конденсаті випарних апаратів із меншою порівняно з кислим середовищем корозійною активністю дещо підвищується. Однак зі збільшенням амплітуди деформації вплив корозійної активності середовища нівелюється і за  $\epsilon \geq 2,5\%$  для азотованих і  $\epsilon \geq 4\%$  для поліпшених зразків їх довговічність на повітрі і в корозивному середовищі збігається (рис. 3). Тут також чітко видно, що, починаючи з амплітуди деформації  $\epsilon \geq 2,5\%$ , застосування АТР для збільшення малоциклової витривалості неефективне.

Довговічність деталей вузлів тертя здебільшого визначають опором втомному багатоцикловому руйнуванню в умовах контакту деталей обладнання харчових виробництв з КАС. Залежно від умов навантаження фрикційного контакту можливий перехід від мало- до багатоциклового руйнування і, навпаки. Як показали дослідження (рис. 4), багатоциклова витривалість сталі 40X після АТР підвищується на повітрі більше ніж на 35%, а в кислому середовищі на 30%. Відомо, що за роботи металу під напруженням дифузійний шар перешкоджає виходу дислокацій на поверхню, гальмуючи зародження і ріст мікротріщин. Крім того, підвищення корозійної тривкості [6] і залишкові напруження стиску після АТР у поверхневих шарах також збільшують границю витривалості азотованих сталей в агресивних середовищах.

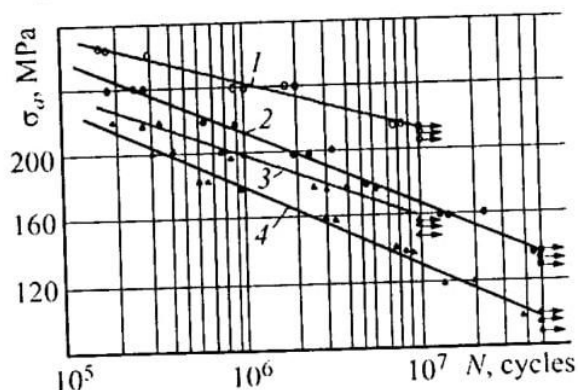


Рис. 4. Опір багатоцикловому навантаженню азотованих (833 К, 75% N<sub>2</sub> + 25% Ar, 265 Па) (1, 2) і поліпшених (3, 4) зразків зі сталі 40X на повітрі (1, 3) та в кислому середовищі (2, 4).

Fig. 4. Resistance to multi-cyclic loading of nitrided (833 K, 75% N<sub>2</sub> + 25% Ar, 265 Pa) (1, 2) and improved (3, 4) samples of 40X steel in air (1, 3) and in an acidic medium (2, 4).

Застосування методу активного планування експерименту дало змогу отримати статистичну модель багатоциклової довговічності сталі 40X в кислому середовищі:

$$N \cdot 10^7 = 15,52 - 0,025T + 0,008C_{N_2} + 0,0006P, \quad (2)$$

де  $T$  – температура азотування, К;  $C_{N_2}$  – вміст азоту в газовій суміші, %;  $P$  – тиск, Па.

З рівняння (2) видно, що найсуттєвіше на кількість циклів до руйнування впливає температура азотування, з підвищенням якої довговічність зменшується.

Збільшення вмісту азоту і тиску газової суміші підвищують втомну витривалість сталі 40X у кислому середовищі.

## ВИСНОВКИ

Дослідження малоциклової довговічності конструкційних сталей після АТР у кислому модельному середовищі показали, що найбільше на неї впливає температура азотування. З її збільшенням малоциклова довговічність знижується. Зі зростанням вмісту вуглецю матриці та ступеня її легування кількість циклів до руйнування зменшується швидше. Збільшення азоту та тиску в газовому середовищі практично не впливають на малоциклову довговічність азотованих сталей у кислому середовищі. Під час азотування осередок циклічного руйнування зазвичай міститься під поверхневим нітридним шаром, а тому його склад практично не впливає на втомні характеристики сталей, а збільшення опору малоциклової витривалості визначають характеристики міцності дифузійного шару ( $\gamma$ - і  $\alpha$ -фаз). Випробування на статичну міцність показали, що АТР сталей підвищує їх характеристики міцності ( $\sigma_B$  і  $\sigma_T$ ), але одночасно знижує пластичність. Встановлено, що кількість циклів до руйнування за малоциклового навантаження сталі 40X у лужному розчині навіть вища, ніж на повітрі, що пояснюється утворенням гідроксидного шару, який блокує вихід дислокацій на поверхню. За амплітуди коливань  $\epsilon < 0,5\%$  різниця в довговічності за малоциклового навантаження азотованих і незміцнених сталей незначна, а при  $\epsilon \geq 2,5\%$  для азотованих і  $\epsilon \geq 4\%$  для поліпшених зразків їх довговічності на повітрі і в корозивному середовищі збігаються. При цьому, починаючи з амплітуди деформації  $\epsilon > 0,25\%$ , застосування АТР для збільшення малоциклової витривалості неефективне. Найсуттєвіше на багатоциклову витривалість впливає температура азотування, а саме: з її підвищенням витривалість азотованих сталей зменшується. Збільшення вмісту азоту та тиску в газовій атмосфері підвищує втомну багатоциклову витривалість азотованих сталей, наприклад, сталі 40X на повітрі більше ніж на 35%, а в кислому середовищі – на 30%.

**РЕЗЮМЕ.** Исследовано влияние режимов азотирования в тлеющем разряде на мало- и многоцикловую усталость конструкционных сталей в кислых, щелочных, нейтральных модельных растворах и на воздухе.

**SUMMARY.** The effect of nitriding modes on the glow discharge on the low- and multi-cycle fatigue of structural steels in acidic, alkaline, neutral model solutions and in air was studied.

1. *Стечишин М. С., Стечишина Н. М., Мартинюк А. В.* Кавітаційно-ерозійна зносостійкість деталей обладнання молокозаводів. – Хмельницький: ХНУ, 2018. – 148 с.
2. *Пастух И. М.* Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
3. *Стечишин М. С., Соколова Г. М., Білик Ю. М.* Вплив енергетичних і режимних параметрів на фазову структуру і мікротвердість іонно-азотованих конструкційних сталей // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – № 2. – С. 56–64.
4. *Ткачев В. И., Бабей Ю. И.* Машина ИП-2 для испытания металлов на малоцикловую усталость в жидких средах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1966. – 1, № 2. – С. 228–229.
5. *Прокопенко А. В., Торгов В. Н.* Методика испытаний компресорных лопаток ГДТ на усталость в коррозионной среде // Проблемы прочности. – 1980. – № 4. – С. 107–109.
6. *Вплив іонного азотування сталей в тліючому розряді на структуру і властивості покриттів / М. С. Стечишин, А. В. Мартинюк, Ю. М. Білик, В. П. Олександренко, Н. М. Стечишина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 3. – С. 49–55.*  
(Influence of the ionic nitriding of steels in glow discharge on the structure and properties of the coatings / M. S. Stechyshyn, A. V. Martynyuk, Yu. M. Bilyk, V. P. Oleksandrenko, N. M. Stechyshyna // Materials Science. – 2017. – 53, № 3. – P. 343–350.)

Одержано 14.09.2018