

УДК 621.726

КІНЕТИКА ЗНОШУВАННЯ СТАЛЕЙ З ДИФУЗІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

П. В. КАПЛУН, В. А. ГОНЧАР, Т. В. ДОНЧЕНКО

Хмельницький національний університет

Встановлено, що на кінетику зношування сталей з дифузійними покриттями за тертя кочення суттєво впливають фізико-механічні властивості і фазовий склад покриттів, твердість основи, а також вид термічної і хіміко-термічної обробок. Залежність зношування від кількості циклів навантаження має параболічний характер. На контактну витривалість за кочення суттєво впливає співвідношення деформаційної складової і від проковзування. Деформаційна складова переважає за малої твердості покриття і основи та призводить до мінімальної контактної витривалості, а від проковзування – за максимальної твердості основи і спричиняє найбільшу контактну витривалість за тертя кочення.

Ключові слова: *кінетика зношування, йонне азотування, нітрогартування, середовище, твердість, основа.*

Вступ. Підвищення контактної витривалості трибосистем за кочення є актуальною проблемою. При цьому більшість конструкційних елементів виходять з ладу через зношування та викришування поверхні внаслідок втоми матеріалу. Дослідженням цих процесів присвячено багато праць [1–7]. Переважно розглядають роботу однорідних матеріалів [1–4], які мають певні обмеження для зростання зносотривкості та контактної витривалості за кочення. Найпоширенішими способами підвищення довговічності за змінного контактного навантаження є цементація та нітроцементація [6]. Але вони високотемпературні і застосовують воденьвмісні середовища насичення, що негативно впливає на характеристики міцності і довговічності конструкційних елементів. Альтернативою цим технологіям є застосування йонного азотування в безводневих насичувальних середовищах та комплексних технологій [5, 8–17]. У деталях машин і вузлах за кочення відбувається проковзування. В цьому випадку зношування складається з пластичного деформування поверхні контакту та її стирання в результаті проковзування. Тому сумарне зношування має дві складові: деформаційну та від проковзування. Зношування однорідних матеріалів за кочення має три стадії: припрацювання, накопичення пошкоджень і руйнування [1–3, 5], які залежать від низки чинників, пов'язаних з властивостями матеріалів, умовами експлуатації тощо. За наявності покриттів сумарне зношування залежить від додаткових чинників: фізико-механічних властивостей та фазового складу покриттів [8, 16], твердості основи [14], залишкових напружень у поверхневих шарах [14, 16], середовища [13, 15], водню в технологічному процесі нанесення покриттів та експлуатації [10–12], навантаження та напружень у градієнтному покритті тощо. Дослідження кінетики зношування за тертя кочення допоможе краще зрозуміти фізику впливу цих чинників на сумарне зношування та співвідношення його складових у композиції покриття–основа.

Методика експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження кінетики зношування зразків різних сталей з дифузійними покриттями за цик-

лічного контактного навантаження виконували за методикою [17] для визначення їх контактної витривалості за тертя кочення.

Сумарне зношування зразків до появи пітингу визначали за формулою

$$U = U_d + U_c, \quad (1)$$

де U_d і U_c – деформаційна та від проковзування складові.

$$U_c = L_n I_n + (L_c - L_n) / I_y. \quad (2)$$

Тут L_c та L_n – шляхи ковзання та припрацювання тіл кочення, відповідно; I_n та I_y – середня інтенсивність зносу в періоди припрацювання та усталеного зносу, відповідно.

Величини L_n , I_n та I_y приймали на основі досліджень [8],

$$L_c = 3,14d_k \cdot N \cdot K, \quad (3)$$

де d_k – діаметр тіла кочення; N – довговічність зразків за кочення; K – коефіцієнт проковзування, який визначали для точкового контакту відповідно до праці [5] ($K = 0,054$), а для лінійного контакту – згідно з працею [2] ($K = 0,26$).

Властивості дифузійних покриттів на сталях після йонного азотування та нітрогартування перед дослідженнями на зносотривкість та контактну витривалість наведені раніше [17].

Результати досліджень та їх обговорення. Показано залежність зносу U та мікротвердості H_{100} на доріжці кочення сталей 40X (рис. 1а) та 20 (рис. 1б) без термообробки і після йонного азотування в мастилі I-20 за випробувань на кочення з точковим контактом і навантаження на кульку 150 N від кількості циклів навантаження.

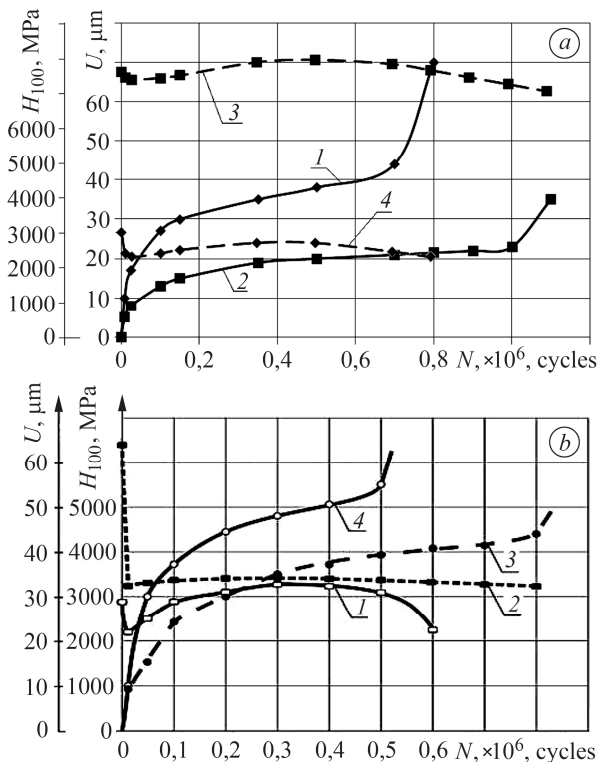


Рис. 1. Зміна зносу U (1, 2) та мікротвердості H_{100} на доріжці кочення (3, 4) сталей 40X (а) та 20 (б) в мастилі I-20 за точкового контакту і навантаження на кульку 150 N залежно від кількості циклів навантаження: 1, 4 – сталь без термообробки; 2, 3 – після йонного азотування.

Fig. 1. Change in wear U (1, 2) and microhardness H_{100} on a rolling path (3, 4) of 40X (a) and 20 (b) steels in I-20 oil with point contact and the load of 150 N applied to a ball depending on a number of loading cycles: 1, 4 – steel without thermal treatment; 2, 3 – after ion nitriding.

Дослідження показали, що в перші цикли навантаження на ділянці контакту виникають суттєві пластичні деформації поверхні матеріалу, які зменшуються і з часом досягають мінімального значення. За навантаження на кульку 150 N вже

після першої хвилини випробувань ($9 \cdot 10^3$ cycles) у зразках сталей 20 і 40X без покриттів внаслідок пластичної деформації на доріжці кочення утворювалася канавка глибиною 17...18 μm . На її краях виникали виступи висотою до 30 μm . Аналогічні виступи утворювалися і на зразках без термічної обробки з подальшим йонним азотуванням, але їх висота була суттєво менша і не перевищувала 10 μm . На зразках з високою твердістю основи (гартованих та нітрогартованих) таких виступів не спостерігали. Після 10 min випробувань ($9 \cdot 10^4$ cycles) пластична деформація становила 60% від сумарного значення деформації та зношування за весь період випробувань від початку і до появи пітингу на доріжці кочення. У азотованих зразках пластична деформація поступово зменшувалась і за аналогічних умов була в 1,5–1,7 разів менша порівняно з неазотованими.

У сталях 40X, ШХ15 і Х12М з пластичністю суттєво меншою, ніж сталі 20, не відбувалося повного руйнування і викришування нітридної зони на поверхні контакту під дією аналогічних циклічних навантажень. У цих сталях у початковий період (до 10^4 cycles) структура поверхні азотованого шару перебудовується, що призводить до суттєво меншого (до 30%) порівняно зі сталлю 20 зниження мікротвердості на доріжці кочення. За подальшого циклічного навантаження структура поверхневого шару ущільнюється і підвищується його мікротвердість до максимального значення, котре на 10...15% перевищує мікротвердість поверхні до початку випробувань. Вона зберігається до початку руйнування (утворення і розвитку мікротріщин) і знижується в період викришування поверхні доріжки кочення.

Показана (табл. 1, рис. 2) кінетика зношування сталі ШХ15 за тертя кочення з лінійним контактом у мастилі І-20 за різних видів термічної та хіміко-термічної обробок.

Таблиця 1. Кінетика зношування сталі ШХ15 за тертя кочення з лінійним контактом у мастилі І-20 за різних видів термічної та хіміко-термічної обробок (тиск на ділянці контакту 2140 МПа)

Кількість навантажень $N, \times 10^6$, cycles	Гартування		Гартування + йонне азотування		Нітрогартування	
	Знос, μm	Мікротвердість H_{100} , МПа	Знос, μm	Мікротвердість H_{100} , МПа	Знос, μm	Мікротвердість H_{100} , МПа
0	0	7200	0	9180	0	8300
0,5	15	7100	10	9000	8	8100
1	22	7000	14	8500	10	7800
3	34	7200	22	6700	17	7600
5	42	7250	27	5300	20	7500
8	49	7250	31	4900	22	7500
12	57	7200	36	4950	24	7500
15,7	65	7100	40	4950	25,5	7450
22	70	6900	43	4900	28	7300
25,7	–	пітинг	48	4700	31	7150
27	–	–	–	пітинг	36	7000

Як бачимо, довговічність до виникнення пітингу на зразках зі сталі ШХ15 після термічної та хіміко-термічної обробок понад 20 разів вища порівняно з азотованими сталями 20 і 40X без термообробки. При цьому в початковий період

зношування деформації в 5–6 разів менші, що призводить до суттєво нижчого сумарного зношування за однаковий період роботи.

Вплив твердості основи на кінетику зношування за тертя кочення подано на рис. 3. Сталь Х12М після нітрогартування за різних температур мала різну твердість основи під азотованим покриттям. Зменшення її твердості через різну кількість залишкового аустеніту призводить до збільшення сумарного зношування та зниження довговічності за кочення. Дослідження показали, що закономірності кінетики зношування сталей за кочення з лінійним та точковим контактами подібні як з покриттями, так і без них за однакових умов випробувань, проте відрізняються абсолютними значеннями порівнюваних показників.

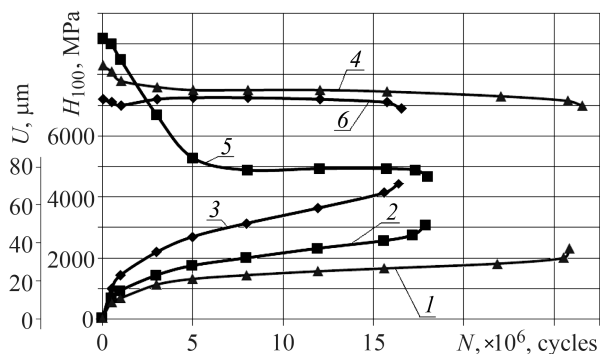


Fig. 2. Change in wear (1–3) and microhardness (4–6) on a rolling path of steel ШХ15 after nitride hardening (1, 4), ion nitriding after hardening (2, 5), hardening (3, 6).

Рис. 2. Зміна зносу (1–3) та мікротвердості (4–6) на доріжці кочення сталі ШХ15 після нітрогартування (1, 4), гартування з подальшим йонним азотуванням (2, 5), гартування (3, 6).

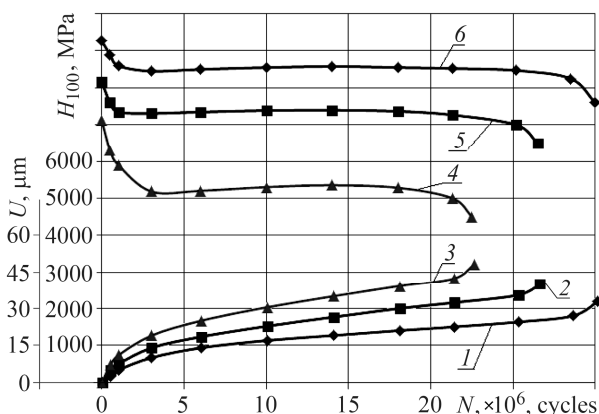


Fig. 3. Change in wear (1–3) and microhardness (4–6) on a rolling path of steel Х12М in the process of rolling friction with linear contact in I-20 oil after nitride hardening at different temperatures of hardening: 1, 6 – 920°C; 2, 5 – 1060°C; 3, 4 – 1120°C. Pressure on contact area is 2140 MPa.

Рис. 3. Залежність зносу (1–3) та мікротвердості (4–6) на доріжці кочення сталі Х12М за тертя кочення з лінійним контактом у мастилі І-20 після нітрогартування від різних температур гартування: 1, 6 – 920°C; 2, 5 – 1060°C; 3, 4 – 1120°C. Тиск на ділянці контакту 2140 МПа.

Деформація залежить від нормального навантаження і більша, що менші твердість та товщина покриття і твердість основи. При цьому змінюється твердість поверхні доріжки кочення, а її шорсткість поступово вирівнюється. Дослідження мікротвердості на доріжці кочення показали, що під час випробувань вона суттєво змінюється – спочатку різко зменшується, а потім поступово збільшується до максимального значення, після чого знову зменшується аж до початку викришування. Аналогічну картину спостерігаємо на зразках різних сталей як з покриттями, так і без них (рис. 1–3). Проте кількісні зміни мікротвердості на доріжці кочення азотованих зразків маловуглецевої сталі 20, середньовуглецевої 40Х і високовуглецевої Х12М різні – азотованій сталі 20 у перші хвилини випро-

бувань різко зменшується (майже в 2–3 рази) і через 10 min ($9 \cdot 10^4$ cycles) знижується до твердості основи (див. рис. 1b). Після цього поступово збільшується на 10...15%, стабілізується за максимального значення та поступово зменшується до моменту викришування доріжки кочення. Різке зменшення мікротвердості на доріжці кочення сталі 20 в початковий період випробувань пояснюється її високою пластичністю і через циклічне навантаження нітридна зона азотованого шару швидко руйнується, видавлюється із зони контакту. На поверхні залишається лише зона внутрішнього азотування з невеликою твердістю. Тому за подальшого циклічного навантаження на поверхні утворюється наклеп і мікротвердість зони (α_N -фази) наближається до значень основи.

На зношування за тертя кочення з проковзуванням суттєво впливає тиск на ділянці контакту. Зі зростанням навантаження значно збільшується зношування і зменшується контактна витривалість зразків (рис. 4). Азотований шар сильно підвищує довговічність зразків. Зі зростанням навантаження на кульку ефективність від нанесення покриття зменшується, що обумовлено збільшенням пластичної деформації через малу твердість основи.

За високих навантажень і малих значень твердості основи виникають великі деформації в покритті від прогину з руйнуванням твердої нітридної зони (див. рис. 1b). Це свідчить про те, що для таких умов існує критичне значення максимального тиску на ділянці контакту, за якого покриття неефективне.

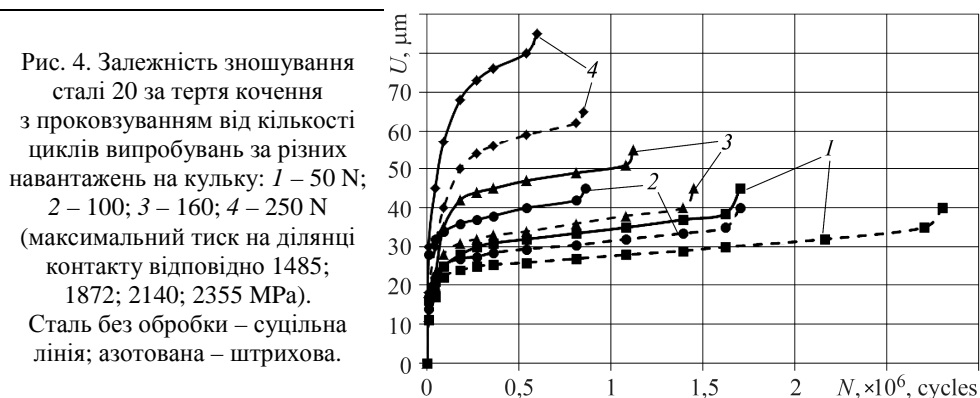


Рис. 4. Залежність зношування сталі 20 за тертя кочення з проковзуванням від кількості циклів випробувань за різних навантажень на кульку: 1 – 50 N; 2 – 100; 3 – 160; 4 – 250 N (максимальний тиск на ділянці контакту відповідно 1485; 1872; 2140; 2355 MPa). Сталь без обробки – суцільна лінія; азотована – штрихова.

Fig. 4. Dependence of wear of steel 20 in the process of rolling friction with slipping on a number of test cycles with different loads on a ball: 1 – 50 N; 2 – 100; 3 – 160; 4 – 250 N (maximum pressure on a contact area is 1485; 1872; 2140; 2355 MPa respectively). Uncoated steel – solid line; nitrided – dashed.

Фізичні процеси на кожній стадії зношування (припрацювання; накопичення пошкоджень; руйнування) за тертя кочення деталей з покриттями і без них подібні і відрізняються лише тривалістю. Це найяскравіше проявляється за тертя кочення нітрогартованих зразків у мастилі. Тут процес може бути настільки сповільненим, що формування вторинних структур, характерних для припрацювання, продовжується аж до другої стадії (4...6 h). Друга ж стадія за контактної втоми починається лише через 6 h випробувань ($6,5 \cdot 10^6$ cycles). При цьому на доріжці кочення зароджуються і розвиваються точкові втоми дефекти. Їх появі передують локальне підвищення твердості (зміцнення) до певного значення і зменшення міцності металу довкола контуру зміцненої області. Ці два стани металу покриття в зоні кочення настільки різні, що легко виявляються за забарвленням – зміцнена область білого кольору, а зона з меншою міцністю – солом'яно-жовтого. Кінцевою фазою формування таких дефектів є зміна кольору зміцненого металу.

Таблиця 2. Залежність зношування та співвідношення його складових від виду термообробки і технології нанесення покриття на сталі 40X за тертя кочення з точковим та лінійним контактами в мастилі I-20

Вид термообробки і технології нанесення покриття	Довговічність $N, \times 10^6$, cycles	Сумарне зношування до появи пітингу, μm	Шлях прокозування L, m	Інтенсивність зношування за прокозування $f \cdot 10^{-9}$	Зношування за прокозування, μm	Складові сумарного зношування, %	
						деформаційна	від прокозування
Точковий контакт							
без термообробки, з йонним азотуванням	0,65	33	786,5	2,5	1,9	94,3	5,7
гартування	21,75	28	26317,5	0,83	21,8	22,2	77,8
гартування + йонне азотування	23,8	29	28798,0	0,89	21,6	25,5	74,5
нітрогартування	44,55	26	53934,8	0,47	25,4	2,4	97,6
Лінійний контакт							
без термообробки, з йонним азотуванням	0,45	35	1653,2	2,3	3,8	89,1	10,9
гартування	16,1	56	59151,4	0,56	33,1	40,9	59,1
гартування + йонне азотування	18,4	58	67601,6	0,52	35,1	39,5	60,5
нітрогартування	29,4	32	108015,6	0,29	31,3	2,2	97,8

До найбільшої пошкоджуваності схильні ділянки краю доріжки кочення, що відповідає епюрі напружень [2]. Необхідно відзначити, що вихідний рельєф поверхні зберігається навіть до кінця другої стадії випробувань, і лише на останній його змінює робочий рельєф. При цьому здатність до травлення доріжки кочення помітно зростає.

Дослідження показали, що вид термічної і хіміко-термічної обробок істотно впливає не лише на контактну витривалість зразків, але і на їх зношування (табл. 2). Сумарне зношування залежить від кількості циклів навантаження до появи пітингу і особливо сильно від співвідношення між собою його складових – деформаційної і від проковзування. У азотованих без термообробки зразках з малою твердістю основи деформаційна складова сумарного зношування за точкового контакту становить 94,3%, а за лінійного – 89,1%. При цьому довговічність зразків мінімальна. Навпаки, в зразках з високою твердістю основи складова від проковзування є визначальною, при цьому довговічність зразків максимальна. Дослідження показали, що зразки з лінійним контактом за всіх видів термічної і хіміко-термічної обробок мали суттєво більше зношування від проковзування (понад 2 рази) порівняно зі зразками з точковим контактом. Це обумовлено великим коефіцієнтом ковзання (0,26) за лінійного контакту проти значно меншого (0,054) за точкового.

ВИСНОВКИ

На кінетику зношування сталей з дифузійними покриттями за тертя кочення сильно впливають фізико-механічні властивості та фазовий склад покриттів, твердість основи, а також вид термічної та хіміко-термічної обробок. Інтенсивність зношування на перших циклах навантаження має максимальне значення завдяки найбільшим значенням складових сумарного зношування – деформаційної і від проковзування, що виникають на поверхні кочення, і поступово зменшується зі збільшенням кількості циклів навантаження. Залежність сумарного зношування від кількості циклів навантаження має нелінійний характер. При цьому твердість поверхні на доріжці кочення спочатку зменшується, потім поступово збільшується через утворенням наклепу матеріалу і знову зменшується в період руйнування. Суттєвий вплив на контактну витривалість має співвідношення складових у сумарному зношуванні. Найбільше впливає на деформаційну складову контактне навантаження та твердість покриття і основи. За малої твердості основи деформаційна складова є визначальною в сумарному зношуванні, що призводить до мінімальної контактної витривалості композиції покриття–основа. На складову від проковзування найбільше впливає хімічний та фазовий склад поверхні покриття, і вона є визначальною в сумарному зношуванні за максимальної твердості основи і забезпечує найвищу контактну витривалість за кочення.

РЕЗЮМЕ. На кинетику изнашивания сталей с диффузионными покрытиями при трении качении большое влияние имеют физико-механические свойства и фазовый состав покрытий, твердость основы, а также вид термической и химико-термической обработок. Зависимость износа от количества циклов нагружения имеет параболический характер. На контактную выносливость при качении большое влияние имеет соотношение составляющих износа – деформационной и от проскальзывания. Деформационная составляющая является преобладающей в износе при малой твердости покрытия и основы и приводит к минимальной контактной выносливости. Составляющая от проскальзывания является преобладающей в износе при максимальной твердости основы и приводит к максимальной контактной выносливости при трении качении.

Ключевые слова: кинетика изнашивания, ионное азотирование, нитрозакаливание, среда, твердость, основа.

SUMMARY. In the process of rolling friction, kinetics of wear of steels with diffusion coatings is dependent on the physical-mechanical properties and phase composition of coatings,

base hardness as well as the type of thermal and chemical-thermal processing. Dependence of wear on the number of loading cycles is always parabolic. The ratio of the components of wear – deformation and wear caused by slipping is of great importance. In case of the surface and a base low hardness, the deformation component prevails in wear, which leads to the minimal contact strength. When the base hardness is maximum, the component caused by slipping prevails in wear, which leads to the maximum contact strength in the process of rolling friction.

Keywords: *kinetics of wear, ion nitriding, nitroquenching, medium, hardness, base.*

1. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
2. Трубин Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1962. – 404 с.
3. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 246 с.
4. Перель Л. Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: справ. – М.: Машиностроение, 1983. – 544 с.
5. Каплун П. В., Паршенко К. А. Підвищення зносостійкості підшипників кочення. – Хмельницький: ХНУ, 2016. – 238 с.
6. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 304 с.
7. Особливості руйнування наводнених високоазотних марганцевих сталей в умовах тертя кочення / О. І. Балицький, В. О. Колесніков, Я. Еліаш, М. Р. Гаврилюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 4. – С. 110–116.
(*Specific features of the fracture of hydrogenated high-nitrogen manganese steels under conditions of rolling friction / O. I. Balyts'kyi, V. O. Kolesnikov, Y. Eliaz, M. R. Havrylyuk // Materials Science. – 2015. – 50, № 4. – P. 604–611.*)
8. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – 344 с.
9. Федірко В. М., Погрелюк І. М. Азотування титану та його сплавів. – К.: Наук. думка, 1995. – 222 с.
10. Швед М. М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – К.: Наук. думка, 1985. – 108 с.
11. Похмурський В. І., Васи́лів Х. Б. Вплив водню на тертя і зношування металів (огляд) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 2. – С. 5–17.
(*Pokhmurs'kyi V. I. and Vasylyv Kh. B. Influence of hydrogen on the friction and wear of metals (a survey) // Materials Science. – 2012. – 48, № 2. – P. 125–138.*)
12. Каплун П. В. Вплив водню на іонне азотування сталей // 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.*)
13. Каплун П. В., Духа О. В., Гончар В. А. Контактна витривалість сталі 40X у різних середовищах після іонного азотування та нітрогартування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 42–47.
(*Kaplun P. V., Dykha O. V., and Gonchar V. A. Contact durability of 40Kh steel in different media after ion nitriding and nitroquenching // Materials Science. – 2018. – 53, № 4. – P. 468–474.*)
14. Kaplun P. V. and Lyashenko B. A. Determination of residual stresses in surface layers upon ion nitriding by microhardness values // Strength of Materials. – 2016. – **48**, № 6. – P. 777–783.
15. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: Сполом, 2008. – 304 с.
16. Kaplun P. V. and Lyashenko B. A. Effect of coatings on the fatigue characteristics of steels under contact load // Strength of Materials. – 2018. – **50**, № 2. – P. 288–294.
17. Каплун П. В., Гончар В. А., Донченко Т. В. Контактна витривалість сталей після іонного азотування у безводневих середовищах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 3. – С. 115–120.
(*Kaplun P. V., Honchar V. A., and Donchenko T. V. Contact durability of steels after ion nitriding in hydrogen-free media // Materials Science. – 2019. – 55, № 3. – P. 424–429.*)

Одержано 22.04.2019