

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Gy, 68.55.J-, 68.55.Ln, 81.40.Pq, 81.65.Kn

## Контактна витривалість та зносостійкість боридних покриттів при терті кочення

С. М. Чернега, П. В. Каплун\*, В. А. Гончар\*

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
просп. Перемоги, 37,  
03056 Київ, Україна*

*\*Хмельницький національний університет,  
вул. Інститутська, 11,  
29016 Хмельницький, Україна*

Подано результати дослідження контактної витривалості та зносостійкості боридних покриттів, що наносилися на сталі 40X і ШХ15 методом хіміко-термічної обробки з борвмісних порошків з додаванням міді при дії зовнішнього магнітного поля. Досліджено кінетику та механізм зношування боридних покриттів у середовищі мастила I-20 при тиску на ділянці контакту 1860 МПа у процесі тертя кочення з лінійним контактом. Визначено довговічність зразків з боридними покриттями на цих сталях при терті кочення до появи пітингу в даних умовах випробувань. Встановлено, що контактна витривалість сталей ШХ15 і 40X з боридними покриттями з участю міді відповідно в 8,6 та 13,7 разів більша порівняно з цими сталями без покриттів.

**Ключові слова:** мікротвердість, зносостійкість, тріщиностійкість, дифузія, борування, бороміднення.

The article represents the results of the study of contact resistance and dura-

---

Corresponding author: Svitlana Mykhaylivna Cherneha  
E-mail: smchernega@ukr.net

*National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',  
37 Peremohy Ave., UA-03056 Kyiv, Ukraine*

*\*Khmelnitskyi National University,  
11 Instytutska Str., UA-29016 Khmelnytskyi, Ukraine*

Citation: S. M. Cherneha, P. V. Kaplun, and V. A. Honchar, Contact Resistance and Durability of Boride Coats at Rolling Friction, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 3: 337–347 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.03.0337](https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0337).

bility of boride coatings that are applied to 40Kh and ShKh15 steels with the use of the method of chemical-thermal processing of boron-containing powders with copper adding under the influence of external magnetic field. Kinetics and mechanism of wear of boride coatings are studied in I-20 lubricant under the pressure of 1860 MPa in the contact area during the process of rolling friction with linear contact. Endurance of samples with boride coatings on these steels at rolling friction before pitting starts under the given test conditions is defined. As determined, the contact resistance of ShKh15 and 40Kh steels with boride coating with copper is 8.6 and 13.7 times more than corresponding values for these steels without coating.

**Key words:** microhardness, durability, crack growth resistance, diffusion, boriding, boride and copper coating.

Представлены результаты исследований контактной выносливости и износостойкости боридных покрытий, которые наносились на стали 40X и ШХ15 методом химико-термической обработки из борсодержащих порошков с добавлением меди при действии внешнего магнитного поля. Исследована кинетика и механизм изнашивания боридных покрытий в среде масла И-20 при давлении на участке контакта 1860 МПа в процессе трения качения с линейным контактом. Определена долговечность образцов с боридными покрытиями на этих сталях при трении качения к появлению питтинга в данных условиях испытаний. Установлено, что контактная выносливость сталей ШХ15 и 40X с боридными покрытиями с участием меди соответственно в 8,6 и 13,7 раз больше по сравнению с этими сталями без покрытий.

**Ключевые слова:** микротвёрдость, износостойкость, трещиностойкость, диффузия, борирование, боромеднение.

*(Отримано 3 вересня 2018 р.)*

## 1. ВСТУП

Основним видом пошкоджень конструкційних елементів при терті кочення є викришування, що відбувається від втоми матеріалу при змінному контактному навантаженні [1–3]. Підвищення їх довговічності має велике значення для народного господарства. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є нанесення на поверхню зміцнювальних покриттів [4–10]. На контактну витривалість конструкційних елементів з покриттями впливають ряд факторів, що залежать від властивостей композиції «покриття–основа», а саме: конструкції і технології нанесення покриттів [5], товщини, твердості та її градієнта по товщині [6], хімічного і фазового складів [7], залишкових напружень в покритті [8], середовища [7–9]. Досліджень впливу цих факторів на контактну витривалість конструкційних елементів з покриттями при коченні дуже мало і вони є актуальними.

Втомне викришування і відшаровування робочих поверхонь кілець і тіл кочення обумовлюється результатом розвитку мікротріщин, що утворюються через повторні мікропластичні зсуви перенапруженого матеріалу. Втомні пошкодження локалізуються в місцях концентрації напружень на поверхні і в підповерхневих шарах [11]. У більшості випадків руйнування починається з поверхні [12, 13]. Утворення підповерхневих тріщин, що викликані контактною втомою металу при дії контактних напружень, спостерігається в матеріалах з неоднорідною структурою (азотованих, цементованих і з поверхневим гартуванням) і пояснюється додатковим впливом залишкових напружень [14].

На сьогодні найбільш поширеними методами нанесення покриттів для підвищення контактної міцності та зносостійкості конструктивних конструкційних елементів є методи ХТО, зокрема технології азотування, цементації та нітроцементації [3]. Однак, ці технології часто не можуть задовольнити зростаючі вимоги щодо зносостійкості робочих поверхонь. У зв'язку з цим останнім часом велику увагу приділяють розробленню нових типів зносостійких покриттів [15]. Серед процесів ХТО особливе місце посідає дифузійне борування металів і стопів із додаванням інших легуючих елементів, що дозволяє змінити структуру і фазовий склад боридних шарів і, як наслідок, досягти більш високої твердості й зносостійкості поверхні, порівняно з іншими видами поверхневої обробки [15–18].

Для підвищення зносостійкості, жаростійкості й корозійної стійкості металів та стопів застосовують борування з легуючими домішками кремнію. У результаті дифузійного насичення змінюється структура поверхневих боридних шарів на сталі та формується прошарок, збагачений легуючими елементами, що має високі експлуатаційні властивості [17, 18]. Боросиліціювання дає змогу підвищити якість поверхні, зменшити крихкість [19]. Метою досліджень є вивчення кінетики зношування та визначення контактної витривалості сталей 40Х та ШХ15 з дифузійними боридними покриттями при терті кочення.

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження проводилися на універсальній установці [20], що дозволяла проводити випробування зразків при терті кочення з точковим і лінійним контактами.

Дослідження проводилися на плоских зразках діаметром 40 мм із сталей 40Х і ШХ15 з дифузійними покриттями і без покриттів. Дифузійні покриття наносилися методом ХТО з твердої фази при температурі 950–975°C протягом 4 годин з використанням борвмісних порошоків та міді [18, 21]. Дифузійні шари, що утворюються в результаті насичення сталевих зразків у сумішах раціональних

складів, складаються з фаз FeB, Fe<sub>2</sub>B та Cu. Фаза FeB товщиною 15–20 нм розташована на поверхні, а фаза Fe<sub>2</sub>B своїми голками проникає в матрицю внутрішньої зони покриття, яка є твердим розчином бору та його сполук в залізі (рис. 1). Мідь дискретно розміщується у верхньому шарі. Товщина дифузійних шарів складала 100–155 нм з твердістю поверхні 16–18 ГПа, що зменшувалася по товщині покриття (рис. 2).

Покриття наносилися на зразки без термічної обробки та після гартування. Перед нанесенням покриттів зразки шліфувалися ( $R_a = 0,125$  нм). Після нанесення покриттів шорсткість поверхні складала  $R_a = 0,0855$  нм.

При випробуваннях тілами кочення були ролики діаметром 4,5 мм і довжиною 4,6 мм, які мали твердість HRC = 63 і рухалися по колу діаметром 30 мм. Випробування проводили в середовищі мастила I-20 при навантаженні на ролик 800 Н, що створювало максимальний тиск на ділянці контакту 1860 МПа та контактні напруження на поверхні 985 МПа [2]. При такому тиску та контактних напруженнях працюють багато конструкційних елементів (підшипники кочення, зубчасті колеса, вальці, що деформують тощо).

У процесі випробувань мало місце проковзування тіл кочення з коефіцієнтом проковзування 26,6% при лінійному контакті. Через певну кількість циклів вимірювали мікротвердість на поверхні доріжки кочення з використанням мікротвердоміра ПМТ-3 та лінійне зношування за допомогою спеціального пристрою з індикаторною голівкою часового типу з точністю  $\pm 0,5$  нм.

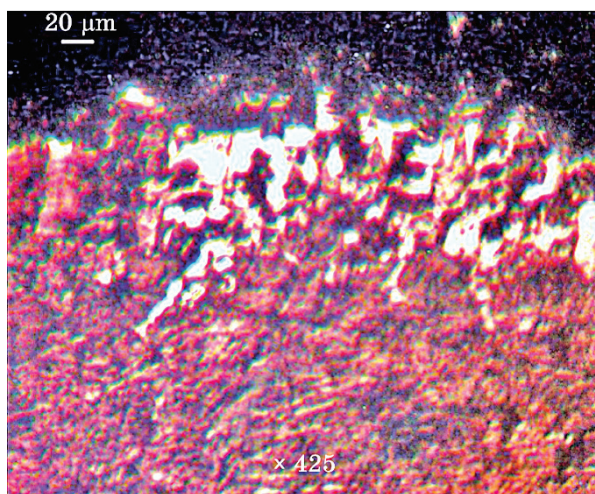


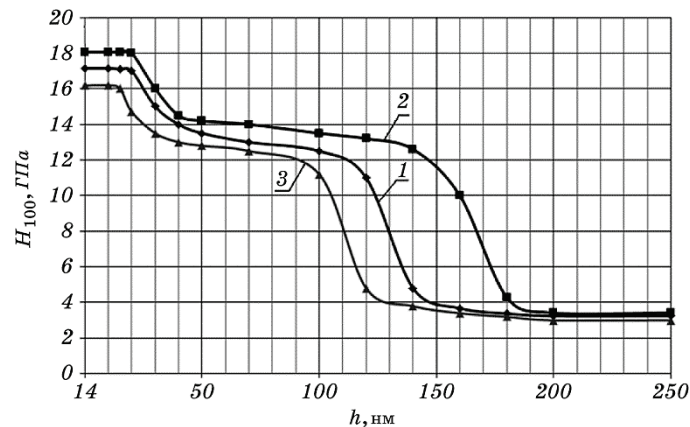
Рис. 1. Бороміднене покриття на сталі 40Х після попереднього гартування.

Fig. 1. Boride and copper coating on 40Kh steel after prehardening.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У таблиці 1 і на рисунку 3 наведено результати досліджень кінетики зношування зразків зі сталей 40X і ШХ15 з боридними покриттями при випробуваннях на тертя кочення з лінійним контактом в мастилі І-20. Дослідження показали, що при тиску на ділянці контакту 1860 МПа і контактних напруженнях на поверхні 985 МПа боридна фаза FeB вже після перших циклів навантаження швидко зношується і при досягненні  $0,675 \cdot 10^6$  циклів навантаження майже повністю руйнується. Це обумовлено великими контактними напруженнями, що значно перевищують максимально допустимі напруження тріщиноутворення в боридних покриттях [18]. Великі контактні напруження виникають від великого тиску на ділянці контакту та прогину покриття під дією зовнішнього навантаження. Як показано в дослідженнях [22], при прогині боридних покриттів виникнення і розповсюдження тріщини від поверхні вглиб покриття відбувається вже при нарузі 311 МПа.

Вимірювання мікротвердості на доріжці кочення показують різке її зменшення до 11–13 ГПа, що відповідає мікротвердості твердого розчину бору та його з'єднань в залізі. З подальшим нарощуванням циклів навантаження, зношення та інтенсивність зношування за цикл зменшуються (табл. 1) та стабілізуються після  $1,35 \cdot 10^6$  циклів навантаження до виникнення пітингу на доріжці кочення (рис. 3). При цьому мікротвердість доріжки кочення теж



**Рис. 2.** Зміна мікротвердості по товщині зразків сталей після нанесення боридних покриттів: 1 — сталь ШХ15 гартована, 2 — сталь 40X гартована, 3 — сталь 40X без термообробки.

**Fig. 2.** Microhardness change along the sample thickness after applying boride coatings: 1—hardened ShKh15 steel, 2—hardened 40Kh steel, 3—40Kh steel without thermal treatment.

поступово зменшується в залежності від товщини зони дифузійного покриття та її зміцнення при пластичній деформації від зовнішнього навантаження.

При терті кочення зношення містить дві складові: одна від пластичної деформації поверхні, друга від проковзування. Фаза FeB має невелику пластичність [18, 19, 22], тому при дії зовнішнього навантаження її зношування відбувається за механізмом крихкого руй-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Кінетика зношування боридних покриттів на сталях 40X і ШХ15 при терті кочення.

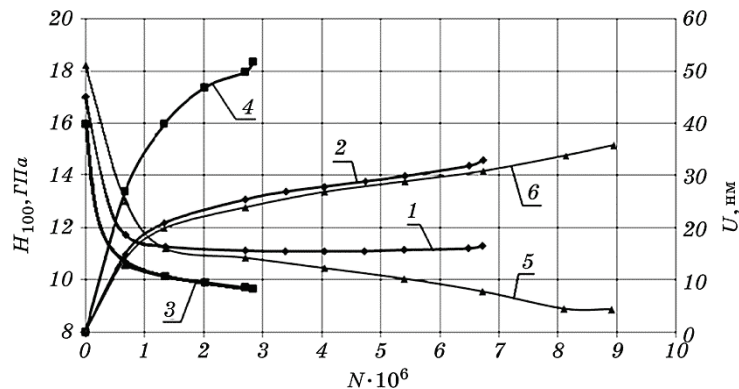
**TABLE 1.** Kinetics of wear of boride coatings on 40Kh and ShKh15 steels at rolling friction.

№ з/п	Кількість циклів навантаження, $N \cdot 10^6$	Мікротвердість $H_{100}$ доріжки кочення, МПа	Зношення, нм	Інтенсивність зношування, $I \cdot 10^{-6}$ нм/цикл
Сталь 40X гартована				
1	0	18060	0	0
2	0,675	13020	14	20,74
3	1,35	11200	20	14,81
4	2,7	10850	24	9,25
5	4,05	10450	27	7,16
6	5,4	10050	29	5,74
7	6,72	9560	31	4,91
8	8,1	8900	34	4,32
9	8,91	8880	36	4,15
10	9,0		руйнування, пітінг	
Сталь ШХ15 гартована				
11	0	17140	0	0
12	0,675	11720	15	22,22
13	1,35	11280	21	15,55
14	2,7	11120	26	9,62
15	3,375	11200	27	8,00
16	4,05	11100	28	6,91
17	4,725	11100	29	6,13
18	5,4	11150	30	5,55
19	6,48	11200	32	4,93
20	6,72	11300	33	4,91
21	8,1		руйнування, пітінг	
22	0	16180	0	0
23	0,675	12540	27	40,00
24	1,35	10220	38	28,14
25	2,025	9900	47	23,20
26	2,7	9700	50	18,51
27	2,835	9640	52	18,34
28	4,05		руйнування, пітінг	

нування, а пластична складова зношення дуже мала. У внутрішній зоні покриття мають місце обидві складові зношення, переважаючою є деформаційна складова.

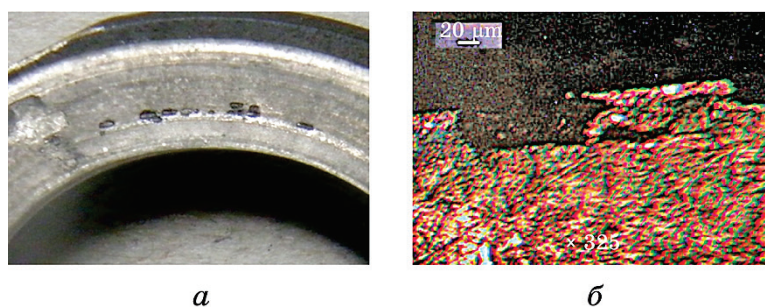
На деформаційну складову зношення великий вплив мають товщина та фазовий склад покриття. Деформаційна складова зношення зменшується зі збільшенням товщини покриття та твердості боридного шару. Дослідженнями [1, 2, 12–14] встановлено механізм зношування і втомного руйнування поверхонь пари кочення однорідних матеріалів, який умовно поділяють на три стадії: припрацювання, накопичення пошкоджень, руйнування. Процес зношування конструкційних елементів з боридними покриттями при коченні подібний до процесу зношування деталей без покриттів.

Проте є відмінності, як в часі їх перебігу, так і в фізиці впливу властивостей покриттів на кожну із них та в цілому на процес зношування та довговічність пари кочення. Перша стадія характеризується великою інтенсивністю зношування фаз FeB і Fe<sub>2</sub>B за механізмом крихкого руйнування при контактних напруженнях, що значно перевищують напруження їх сколювання та утворення мікротріщин, є відносно швидкоплинною і не перевищує 10% від загальної довговічності. При цьому продукти зношування, що мають високу твердість, є абразивом в подальших стадіях зношування. Друга стадія зношування має велику протяжність в часі, в якій має місце деформаційна складова зношення та втомно-абразивне зно-



**Рис. 3.** Залежність зношення (2, 4, 6) та мікротвердості на доріжці кочення (1, 3, 5) сталей з боридними покриттями від кількості циклів навантаження: сталь ШХ15 після гартування (1, 2), сталь 40Х без термообробки (3, 4) та сталь 40Х після гартування (5, 6).

**Fig. 3.** Dependence of wear (2, 4, 6) and microhardness of steel with boride coatings on rolling path (1, 3, 5) on the number of loading periods: ShKh15 steel after hardening (1, 2), 40Kh steel without thermal treatment (3, 4) and 40X steel after hardening (5, 6).



**Рис. 4.** Доріжка кочення з пітінгом (а) та втомні викришування на поверхні кочення (б).

**Fig. 4.** Rolling path with pitting (a) and fatigue spalling on rolling surface (b).

шування від проковзування тіл кочення.

Зношення та інтенсивність зношування зменшуються і відбувається накопичення пошкоджень в покритті в результаті мікропластичних деформацій від зовнішнього навантаження. При цьому поступово зменшується твердість на доріжці кочення. У третій стадії відбувається викришування поверхні у зв'язку з вичерпанням пластичних деформацій та швидкий розвиток тріщин з утворенням на поверхні ямок та пітінгу (рис. 4).

У таблиці 2 наведено результати контактної витривалості зразків із сталей 40X і ШХ15 після випробувань при терті кочення з ліній-

**ТАБЛИЦЯ 2.** Результати порівняльних випробувань контактної витривалості сталей 40X і ШХ15 з боридними покриттями на тертя кочення з лінійним контактом в мастилі I-20 при максимальному тиску на ділянці контакту 1860 МПа.

**TABLE 2.** The results of comparison tests of contact resistance of 40Kh and ShKh15 steels with boride coating for rolling friction with linear contact in I-20 lubricant under maximal pressure of 1860 MPa in the contact area.

№ з/п	Марка сталі та вид термообробки	Товщина покриття $h$ , нм	Твердість поверхні $H_{100}$ , МПа	Твердість основи $H_{100}$ , МПа	Довговічність $N \cdot 10^6$ циклів
1	40X без термообробки	–	3200	3100	0,65
2	40X без термообробки + боридне покриття	100	16180	2920	2,83
3	40X гартована + боридне покриття	155	18060	2980	8,91
4	ШХ15 без термообробки	–	3300	3200	0,75
5	ШХ15 гартування + боридне покриття	120	16180	2950	6,48



ним контактом в мастилі І-20 з тиском на ділянці контакту 1860 МПа. Результати досліджень показують, що найвищу довговічність  $8,91 \cdot 10^6$  циклів навантаження мали зразки зі сталі 40Х з боромідненим покриттям товщиною 155 нм та попереднім гартуванням перед нанесенням покриття, яка в 13,7 рази перевищує її контактну витривалість без термічної обробки. Контактна витривалість сталі ШХ15 з боромідненим покриттям товщиною 120 нм та попереднім гартуванням перед нанесенням покриття складала  $6,48 \cdot 10^6$  циклів навантаження, що в 8,6 рази більша порівняно з її значенням без термообробки.

Зменшення довговічності сталі ШХ15 порівняно зі сталлю 40Х після нанесення боридних покриттів пояснюється меншою товщиною та твердістю сталі ШХ15. Менша контактна витривалість бороміднених зразків сталі 40Х без термообробки порівняно з цією сталлю, що гартувалася і мала мартенситну структуру перед нанесенням покриття, обумовлена значно меншою товщиною покриття та іншою структурою матеріалу перед боруванням.

#### 4. ВИСНОВКИ

Дифузійні бороміднені покриття є ефективним методом підвищення зносостійкості та контактної витривалості сталей при терті кочення. Їх довговічність залежить від величини тиску на ділянці контакту, структури, фазового складу та товщини покриття і зростає зі збільшенням останньої. На основі досліджень уточнено механізм зношування та руйнування борованих покриттів при терті кочення. Встановлено, що контактна витривалість сталей ШХ15 і 40Х з боридними покриттями зі застосуванням міді відповідно у 8,6 та 13,7 разів вища порівняно з її значеннями для цих сталей без покриттів.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. К. Джонсон, *Механика контактного взаимодействия* (Москва: Мир: 1989).
2. Г. К. Трубин, *Контактная усталость материалов для зубчатых колес* (Москва: Машгиз: 1962).
3. В. М. Зинченко, *Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки* (Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана: 2001).
4. O. V. Zaitsev, V. G. Kaplun, S. V. Ivashchuk, and P. E. Filyushin, *Metal Science and Heat Treatment*, **32**: 650 (1990).
5. П. В. Каплун, К. А. Паршенко, *Підвищення зносостійкості підшипників кочення* (Хмельницький: ХНУ, 2016).
6. П. В. Каплун, *Проблеми трибології*, **80**, № 2: 15 (2016).
7. П. В. Каплун, О. В. Диха, В. А. Гончар, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, Вип. 4: 42 (2017).

8. П. В. Каплун, Б. А. Ляшенко, *Пробл. прочности*, № 6: 56 (2016).
9. П. В. Каплун, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, Вип. 6: 68 (2017).
10. П. В. Каплун, В. А. Гончар, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, Вип. 3: 95 (2016).
11. Е. В. Торская, *Механика твердого тела*, № 6: 122 (2011).
12. Б. Д. Грозин, Б. И. Костецкий, *Вестник машиностроения*, № 12: 36 (1947).
13. А. В. Осипян, *Труды НАТИ*, Вып. 43: 65 (1945).
14. С. В. Пинегин, *Контактная прочность и сопротивление качению* (Москва: Машиностроение: 1969).
15. Ю. А. Баландин, *Защита металлов*, 42, № 2: 150 (2006).
16. А. А. Алиев, В. П. Булгаков, Б. С. Приходько, *Вестник Астраханского государственного технического университета*, № 2: 91 (2005).
17. С. М. Чернега, І. А. Поляков, І. О. Красовський, *Металознавство та обробка металів*, 76, № 4: 51 (2015).
18. С. М. Чернега, І. А. Поляков, *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, Серія «Машинобудування», 2, № 61: 104 (2011).
19. С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський, *Проблеми тертя та зношування*, 67, № 2: 141 (2015).
20. П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко, *Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням*, Патент 106181 UA, МПК (2016.01), G01L 1/00 (Опубл. 25.04.2016, бюл. № 8) (2016).
21. С. М. Чернега, І. А. Поляков, І. Ю. Медова, *Склад порошкової суміші для бороміднення сталевих виробів*, Патент 83894 UA, МПК (2013.01), C23C 8/00 (Опубл. 10.10.2013, бюл. № 19) (2013).
22. С. М. Чернега, Ю. М. Подрезов, І. Т. Ярматов, М. О. Красовський, *Металознавство та обробка металів*, № 1: 32 (2010).

## REFERENCES

1. K. Johnson, *Mekhanika Kontaktnogo Vzaimodeystviya* [Contact Mechanics] (Moscow: Mir: 1989) (Russian translation).
2. G. K. Trubin, *Kontaktnaya Ustalost Materialov dlya Zubchatykh Koles* [Contact Fatigue of Materials for Gears] (Moscow: Mashgiz: 1962) (in Russian).
3. V. M. Zinchenko, *Inzheneriya Poverkhnosti Zubchatykh Koles Metodami Khimiko-Termicheskoy Obrabotki* [Engineering of the Surface of Gears by Methods of Chemical Heat Treatment] (Moscow: MGTU im. N. E. Baumana: 2001) (in Russian).
4. O. V. Zaitsev, V. G. Kaplun, S. V. Ivashchuk, and P. E. Filyushin, *Metal Science and Heat Treatment*, 32: 650 (1990).
5. P. V. Kaplun and K. A. Parshenko, *Pidvyshchennya Znosostiykosti Pidshyupnykiv Kochennya* [Increase of Wear Resistance of Roller Bearings] (Khmelnysky: KhNU: 2016) (in Ukrainian).
6. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Problemy Trybolohiyi*, 80, No. 2: 15 (2016) (in Ukrainian).
7. P. V. Kaplun, O. V. Dykha, and V. A. Honchar, *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, Iss. 4: 42 (2017) (in Ukrainian).
8. P. V. Kaplun and B. A. Lyashenko, *Strength Mater.*, 48, Iss. 6: 777 (2016).

9. P. V. Kaplun, *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, Iss. 6: 68 (2017) (in Ukrainian).
10. P. V. Kaplun and V. A. Honchar, *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, Iss. 3: 95 (2016) (in Ukrainian).
11. E. V. Torskaya, *Mech. Solids*, 46, Iss. 6: 913 (2011).
12. B. D. Grozin and B. I. Kostetskiy, *Vestnik Mashynostroeniya*, No. 12: 36 (1947) (in Russian).
13. A. V. Osipyany, *Trudy NATI*, Iss. 43: 65 (1945) (in Russian).
14. S. V. Pinegin, *Kontaktnaya Prochnost i Soprotivlenie Kacheniyu* [Contact Strength and Rolling Resistance] (Moscow: Mashinostroenie: 1969) (in Russian).
15. Yu. A. Balandin, *Protection of Metals*, 42, No. 2: 137 (2006).
16. A. A. Aliev, V. P. Bulgakov, and B. S. Pryhodko, *Vestnik Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, No. 2: 91 (2005) (in Russian).
17. S. M. Chernega, I. A. Polyakov, and I. O. Krasovskiy, *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 76, No. 4: 51 (2015) (in Ukrainian).
18. S. M. Chernega and I. A. Polyakov, *Visnyk Natsionalnogo Tekhnichnogo Universytetu Ukrayiny «Kyivskiy Politekhnichnyi Instytut», Seriya «Mashynobuduvannya»*, 2, No. 61: 104 (2011) (in Ukrainian).
19. S. M. Chernega, I. A. Polyakov, and I. O. Krasovskiy, *Problemy Tertya ta Znoshuvannya*, 67, No. 2: 141 (2015) (in Ukrainian).
20. P. V. Kaplun, V. A. Honchar, and K. A. Parshenko, *Sposib Vyprobuvan na Kontaktnu Vytryvalist pry Kochenni z Prokovzuvannyam* [Method of Contact Durability Testing under Rolling with Slipping], Patent 106181 UA. MPK (2016.01), G01L 1/00 (Publ. April 25, 2016, bull. No. 8) (2016) (in Ukrainian).
21. S. M. Chernega, I. A. Polyakov, and I. Yu. Medova, *Sklad Poroshkovoyi Sumishi dlya Boromidnennya Stalevykh Vyrobit* [Composition of Powder Mixture for Boride and Copper Coating of Steel Products], Patent 83894 UA, MPK (2013.01), C23C 8/00 (Publ. October 10, 2013, bull. No. 19) (2013) (in Ukrainian).
22. S. M. Chernega, Yu. M. Podrezov, I. T. Yarmatov, and M. O. Krasovskiy, *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, No. 1: 32 (2010) (in Ukrainian).