

УДК:620.178.162

ФРИКЦІЙНА ПОВЕДІНКА ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ ЗА УМОВ ГРАНИЧНОГО МАЩЕННЯ

В. М. ГОЛУБЕЦЬ¹, В. М. ДОВГУНИК², М. І. ПАШЕЧКО³,
С. А. КОРНІЙ², Ю. С. ШПУЛЯР¹

¹ Національний лісотехнічний університет України, Львів;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Люблінський політехнічний інститут, Польща

Досліджено фрикційні характеристики пар тертя зі сталі 45 “диск–колодка (сегмент)” із нанесеними електроіскровими покриттями. Проаналізовано їх зносотривкість за граничного мащення, морфологію поверхневих шарів або вторинних структур, сформованих на контртілі під час тертя.

Ключові слова: електроіскрові покриття, зносотривкість, коефіцієнт тертя, морфологія, елементний аналіз.

Вступ. Для підвищення довговічності та надійності деталей машин важливе значення мають технологічні методи модифікування металевих поверхонь пар тертя [1–5], зокрема електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дає можливість змінювати властивості поверхні вихідного металу через формування на ній нового за структурою та хімічним складом матеріалу.

Дослідженню зносотривкості електроіскрових покриттів (ЕІП) присвячено велику кількість праць. Як електроди для ЕІЛ використовують різні матеріали: тверді сплави на основі вольфраму та титану та із додаванням вуглецю (ВК 20 У, ТК 15 К6 У), ферохром, білий чавун тощо, а також порошкові дроти (ПД). Розміри зношених деталей, як правило, відновлюють електродами із матеріалів, близьких за фізико-механічними характеристиками до вихідного.

Відомі спроби пошуку недорогих електродних матеріалів із евтектичних сплавів [6, 7], ПД [8, 9] та комбінованих електродів [8]. Перспективними тут вважають комплексні технології ЕІЛ [7, 10], а також комбіноване легування фрикційної поверхні ферохромом у поєднанні із графітом [11]. Однак трибологічна поведінка ЕІП, сформованих ЕІЛ із ПД, вивчена недостатньо.

Тому мета дослідження – проаналізувати ефективність ЕІЛ сталі 45 з використанням як електродів твердих сплавів на основі титану Т15К6 і ПД, перевірити раціональні технологічні режими нанесення ЕІП та оцінити їх трибологічні характеристики за умов граничного мащення.

Методика випроб. Досліджували зразки “диск” без покриття і “колодка (сегмент)” із ЕІП. Тобто сформували обернену пару тертя, оскільки, згідно з прийнятими у трибології правилами, покриття наносять переважно на “диск”. Формували покриття і на контртілі. Коефіцієнт взаємного перекриття у трибо-спряженні становив 0,125, тобто контртіло у 8 разів довше контактувало із диском.

Зразки “диск” гартували та відпускали (HRC 54...56), а зразки “сегмент” перед нанесенням покриттів нормалізували (HRB 85...90). Зовнішній діаметр “дисків” і внутрішній “колодки” ($40 \pm 0,02$ mm), а також товщина (10 mm) були однакові.

ЕПШ на контртілах (сегментах) формували із електродів: Т15К6; Т15К6 + графіт; ПД (80Х20Р3Т) системи Fe–Cr–В–С; комбінованого електрода ПДГ (із ПД з додатком графіту МПГ-7). Діаметр ПД 3,2 mm, ПДГ 6 mm. Довжина електродів 30 mm. Компонентний склад шихти ПД з оболонкою зі сталі 08кп, конструкцію комбінованого ПДГ та режими ЕПШ на установці “Елітрон-20” детально описано [8].

Трибологічну поведінку пар за площинного контактування досліджували на машині тертя СМЦ-2 (ГОСТ 23.224-86) за схемою “диск–колодка”. Співвідношення площ контактних поверхонь за фрикційної взаємодії 0,125. Нерухомий зразок (колодка) закріплювали за допомогою самоналаштувального пристосування, яке забезпечувало незмінність геометричної площі контакту та взаємного розташування контактних поверхонь. Це дало можливість правильно оцінювати зміни трибологічних параметрів у спряженні. Одночасно фіксували зміну моменту тертя безконтактним індуктивним давачем, змонтованим на валу установки, та температуру триборозігріву контртіл хромельалюмелевою термопарою, вмонтованою в них на відстані 0,5 mm від зони контакту. Швидкість ковзання 0,67 m/s. Контактне навантаження 2 та 5 МПа. Тривалість випробувань 4 h. Під час експериментів здійснювали комп’ютерний запис електричних сигналів від зміни вимірюваних параметрів у мілівольтах із кроком 0,25 s. Мاستило – індустріальна олива І-20 (ГОСТ 20799-88).

Щоб проконтролювати зношування, зразки зважували на аналітичній вазі Radwag WAA 160 (похибка $\pm 0,0001$ g). Мікроструктуру та елементний склад вторинних структур зразків “колодка” вивчали на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP (Carl Zeiss) зі системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy.

Результати та їх аналіз. Мікротвердість $H_{\mu 50}$ ЕПШ із ПД становить 7,765 GPa (HV 1710), з ПДГ – 14 GPa (HV 2311), твердість HRA ЕПШ зі сплаву Т15К6 становить 88...90, з Т15К6 + графіт – 89...92. Трибологічними дослідженнями контактних пар за навантажень 2 та 5 МПа виявили, що під час фрикційної взаємодії зношуються не тільки гартовані сталеві диски, а й несуттєво набувають ваги контактні пари – сегменти, модифіковані ЕПШ (рис. 1). Зокрема, за навантаження 2 МПа найбільше зношуються диски за контактування з ЕПШ із електродного дроту Т15К6 (рис. 1a; поз. 1), а найвідчутніше зростає вага контртіл з ЕПШ за використання електрода Т15К6 + графіт (рис. 1b; поз. 2). За використання електродів як із ПД, так і ПДГ диски зношуються і контртіла набувають вагу не так відчутно (рис. 1a, b; поз. 3, 4).

За навантаження 5 МПа поведінка контактних пар інша. Найменше зношуються зразки “диск” під час контактування з ЕПШ, сформованим із електрода Т15К6 (рис. 1c; поз. 1), а найвідчутніше – коли електродом був ПД (рис. 1c; поз. 3). Тут найбільше набуває вагу контртіло (рис. 1d; поз. 3). Суттєво менше зношувалися зразки, коли електродом були ПДГ (рис. 1c; поз. 4). Слід зауважити, що попри присутність оберненої пари тертя елементи пари “диск–колодка з ЕП із Т15К6+ Г” та з “ЕПШ із ПДГ” зношуються, як у звичайній прямій парі (рис. 1c, d; поз. 2 і 4, відповідно). Проте інтенсивніше за використання ЕПШ із електрода Т15К6 + Г (рис. 1c; поз. 2), ніж з ЕПШ із ПДГ (рис. 1d, поз. 4).

Виявили, що за фрикційної взаємодії практично у всіх експериментах за контактування ЕПШ зі сталлю (диском) зростає вага зразків внаслідок перенесення заліза із диска на колодку із ЕПШ та із ЕПШ – на сталевий диск. Очевидно, що через високу мікротвердість і пористість ЕПШ відбуваються мікрорізання поверхонь сталевих дисків та частинки сталі переносяться в зону контакту пар тертя. Можливий й інший механізм взаємодії, зокрема, спричинений трибоелектрохімічною поведінкою контактної пари тертя.

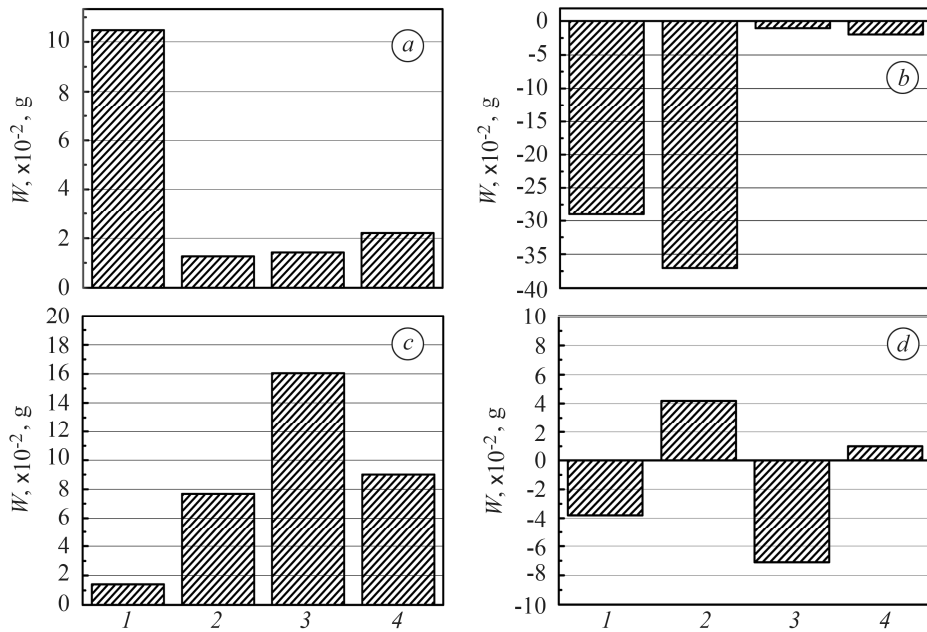


Рис. 1. Усереднені значення зміни ваги дисків (a, c) та контргіл (b, d) в усталеному режимі тертя під навантаженнями 2 (a, b) та 5 МПа (c, d) упродовж 4 h:
1 – електрод Т15К6; 2 – Т15К6 + Г; 3 – ПД; 4 – ПДГ (з додатком графіту).

Fig. 1. The averaged values of the change in the weight of the discs (a, c) and the counter body (b, d) in the steady state of friction under loading of 2 (a, b) and at load of 5 MPa (c, d) test time 4 h: 1 – electrode T15K6; 2 – T15K6 + G; 3 – PD; 4 – PDG (with the addition of graphite).

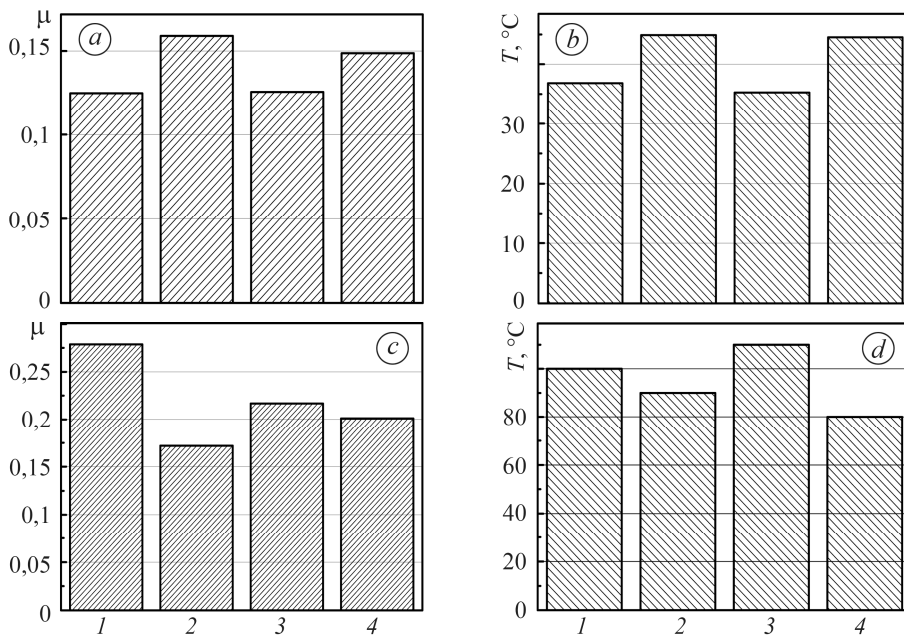


Рис. 2. Усереднені значення зміни коефіцієнтів тертя (a, c) та температур триборозігріву (b, d) контактних пар “диск (зі сталі 45)–колотка (із ЕПП)” за навантажень 2 (a, b) та 5 МПа (c, d). (Позначення див. рис. 1).

Fig. 2. The averaged values of the change in the friction coefficients (a, c), and the temperatures of the triboheating (b, d) of the contact pairs the “disc (steel 45)–the counter bodies (EAC)” at load of 2 (a, b) and 5 MPa (c, d). (Marking see Fig. 1).

Збільшення ваги диска в оберненій парі тертя можливе внаслідок утворення оксидних плівок та нагромадження продуктів зносу у зоні контакту [12]. Відомо також, що такі пари стійкіші до заїдання (scuffing) – зчеплення поверхонь тертя і зриву через схоплювання та перенесення матеріалів [13].

Побудували (рис. 2) гістограми зміни коефіцієнтів тертя і температур триборозігріву в зоні контакту. За навантаження 2 МПа значення коефіцієнта тертя μ знаходяться в допустимих межах 0,125...0,152. Найбільше значення має ЕПП, сформоване із електрода Т15К6 з додатком графіту (рис. 2а; поз. 2). Температура триборозігріву пар (рис. 2b) не перевершує 45°C, що також відповідає допустимим межам. За навантаження 5 МПа коефіцієнт тертя пари дещо збільшується. Найменші його значення 0,155...0,20 зафіксували для зразків з ЕПП, отриманими із електрода Т15К6 + Г та ПДГ (рис. 2с; поз. 2, 4). При цьому в зоні контакту найнижча і температура (80... 88°C) (рис. 2d; поз. 4, 2, відповідно).

Електронно-мікроскопічні дослідження ЕПП із електродів Т15К6 як до випробувань, так і після засвідчили, що на поверхні тертя після фрикційної взаємодії кількість заліза збільшується із 2,03 до 3,29 ат.%, що може вказувати на натирання ним поверхні ЕПП. Кількість вуглецю зменшується із 76,89 до 72,59, кисню зростає із 15,53 до 17,48 ат.%, а також підвищується вміст кальцію та вольфраму.

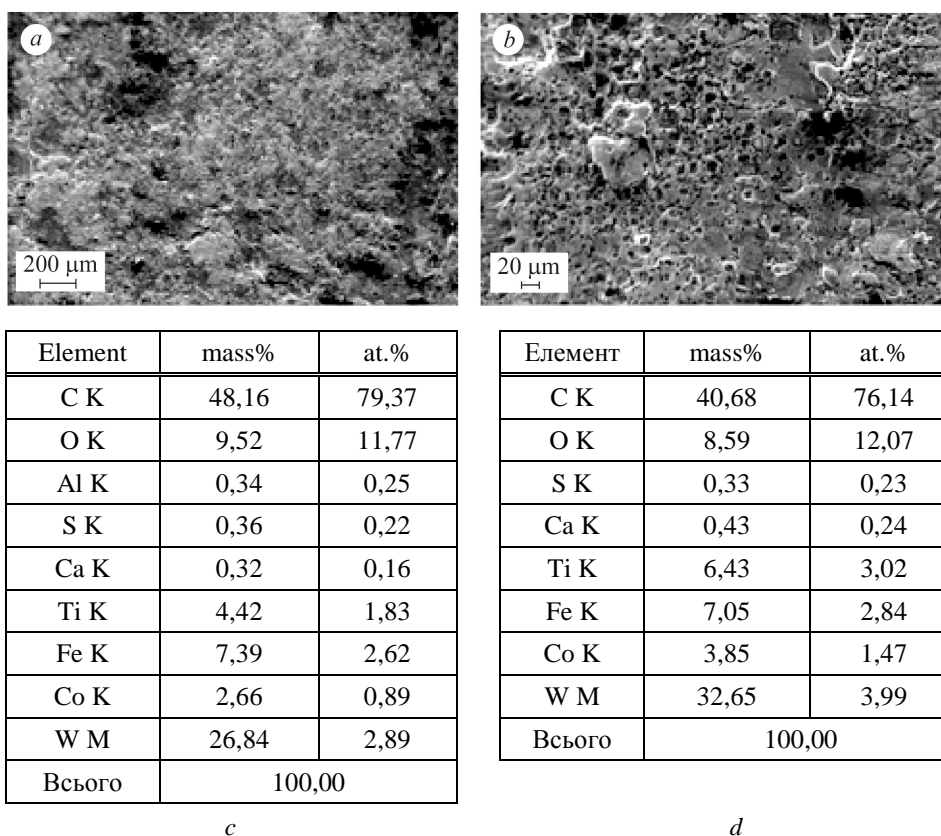
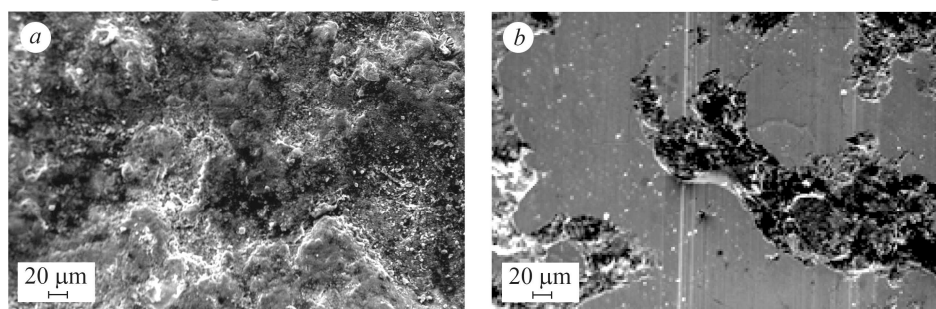


Рис. 3. Морфологія (a, b) та елементний аналіз (c, d) поверхні зразка із ЕПП з електрода Т15К6 + Г: a, c – вихідний стан; b, d – після фрикційної взаємодії.

Fig. 3. Morphology (a, b) and elemental analysis (c, d) of the surface of the sample from EAC with T15K6 + G: a, c – the initial state; b, d – after the friction interaction.

Після фрикційної взаємодії ЕПП з електрода Т15К6 + Г зі сталлю на поверхні сегмента (рис. 3с, d) вміст вольфраму зростає із 2,89 до 3,99, титану – із 1,83 до

3,02, кобальту – із 0,89 до 1,47 at.%. Кількість решти елементів змінюється несуттєво. Під час взаємодії на поверхні контргіла з ЕП із ПД (80Х20Р3Т) порівняно із вихідною кількістю заліза зменшується із 40,19 до 6,57, а хрому – із 4,37 до 3,60 at.%. Водночас вміст кисню зростає із 11,04 до 23,69 at.%, алюмінію – із 0,57 до 1,97 at.%. Вміст магнію 0,52 at.%. Після взаємодії (рис. 4с, d) на поверхні ПДГ (сталь 80Х20Р3Т із додатком графіту), синтезованого на сегменті, кількість кисню збільшується від 11,98 до 13,68, алюмінію – із 0,21 до 0,64, хрому – із 0,78 до 7,02, заліза – із 5,65 до 21,37 at.%, а вуглецю зменшилась із 80,56 до 56,42 і дещо збільшився вміст кремнію (із 0,24 до 0,39 at.%).



Element	mass%	at. %
C K	62,52	80,56
O K	12,39	11,98
Na K	0,23	0,15
Al K	0,37	0,21
Si K	0,44	0,24
S K	0,34	0,16
Ca K	0,58	0,22
Cr K	2,63	0,78
Fe K	20,37	5,65
Co K	0,12	0,03
Всього	100,00	

Element	mass%	at. %
C K	27,10	56,42
O K	8,75	13,68
Al K	0,70	0,64
Si K	0,44	0,39
S K	0,30	0,24
Ca K	0,39	0,24
Cr K	14,60	7,02
Fe K	47,72	21,37
Всього	100,00	

c

d

Рис. 4. Зміна морфології (a, b) та елементного складу поверхонь тертя (c, d) зразка із ПДГ (комбінований електрод із додатком графіту) після ЕІЛ: a, c – вихідний стан; b, d – після фрикційної взаємодії.

Fig. 4. Changing of the surface morphology (a, b) and the elemental composition of the friction surfaces (c, d) of the sample from the PDG (combined electrode with graphite) after EIL: a, c – the initial state; b, d – after the friction interaction.

У всіх випадках на поверхнях зразків контргіл з ЕП після фрикційної взаємодії виявили сліди вторинних структур. Під час фрикційної активації зони контакту генеруються локальні температурні спалахи, які викликають трибохімічні реакції на нанорівні згідно з концепціями NIRAM [14], NAE (nuclear active environmental), LENR (low energy nuclear reactions) та LANR (lattice assisted nuclear reactions).

ВИСНОВКИ

Встановлено закономірності зношування сталі 45 з ЕП із твердого сплаву Т15К6 і ПД, а також з ПДГ за наявності оберненої пари тертя. Виявлено, що за

навантаження 5 МПа обернені пари з ЕП, отриманим із ПДГ, можуть працювати як прямі з найменшим зносом. Проаналізовано морфологію і елементний склад поверхонь тертя до і після фрикційної взаємодії ЕП за умов граничного мащення. Загалом знос пар тертя зі сталі 45 з ЕП спричиняють тверді продукти трибохімічних реакцій – вторинні структури, а також механічне зношування вихідного матеріалу. Тому актуально вивчити фрикційну поведінку ЕП за умов граничного мащення, коли присутня пряма пара тертя.

РЕЗЮМЕ. Исследованы фрикционные характеристики пар трения из стали 45 “диск–колодка (сегмент)” с нанесенными электроискровыми покрытиями. Проанализирована их износостойкость при граничном смазывании, морфология поверхностных слоев или вторичных структур, сформированных на контртеле при трении.

SUMMARY. The frictional characteristics of friction pairs of 45 steel “disc–block (segment)” with electrospark coatings were investigated. Their wear resistance under boundary lubrication, morphology of surface layers, or secondary structures formed on the counterframe during friction were analyzed.

1. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник та ін. – Львів: Фіз.-мех. ін-т НАНУ, 2005. – 192 с.
2. *Burakowski T., Wiezchon T. Inzenieria powierzchni metali.* – Warszawa:WNT, 1995. – 556 s.
3. *Трибомеханика.* Триботехника. Триботехнологии: в 3-х т. / М. В. Чернец, Л. П. Клименко, М. И. Пашечко, А. Невчас. – Николаев: Изд-во Черноморского нац. ун-та им. Петра Могилы, 2008. – 2. – 304 с.
4. *Пашечко М. И., Голубец В. М., Чернец М. В.* Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий. – К.: Наук. думка, 1993. – 344 с.
5. *Чернец М., Пашечко М., Невчас А.* Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів трибосистем ковзання // *Методи прогнозування та підвищення зносостійкості трибосистем ковзання.* – Дрогобич: Коло, 2001. – 2. – 512 с.
6. *Евтектичні електродні матеріали для електроіскрового легування та їх властивості* / М. І. Пашечко, В. М. Голубець, О. Б. Гасій, Б. П. Чайковський // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 1991. – 27, № 1. – С. 56–60.
(*Properties of eutectic electrode materials for electrospark alloying* / M. I. Pashechko, V. M. Golubets', O. B. Gasii, and B. P. Chaikovskii // *Materials Science.* – 1991. – 27, № 1. – P. 47–51.)
7. *Голубець В. М., Білоус О. В.* Розробка нового евтектичного електродного сплаву для нанесення зносостійких покриттів на ріжучий інструмент комплексним ЕП і лазерною обробкою // *Проблеми трибології.* – 2001. – № 2. – С. 56–61.
8. *Мікромеханічні характеристики поверхневого шару сталі 45 після електроіскрової обробки* / В. М. Голубець, М. І. Пашечко, Я. Борц, М. Барщ // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2019. – 55, № 3. – С. 102–108.
(*Micromechanical characteristics of the surface layer of 45 steel after electric-spark treatment* / V. M. Golubets', M. I. Pashechko, J. Borc, and M. Barszcz // *Materials Science.* – 2019. – 55, № 3. – P. 409–415.)
9. *Голубець В. М., Гончар І. М., Шпуляр Ю. С.* Підвищення стійкості метало- і дереворізного інструменту нанесенням електроіскрових покриттів // *Наук. вісник Нац. лісотехн. ун-ту України.* – 2018. – 28, № 2. – С. 111–114.
10. *Ботвинко О. П.* Підвищення працездатності інструменту з швидкоріжучих сталей шляхом комбінованого впливу електроіскрового легування та лазерної обробки: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – К.: ПІМ НАНУ, 1998.
11. *Створення функціональних покриттів на поверхні маловуглецевої сталі багатостадійним електроіскровим легуванням хромом та графітом у насичувальних середовищах* / С. В. Іващенко, Г. Г. Лобачова, Н. А. Шаповалова, К. Є. Ігнатюк // *Проблеми тертя та зношування.* – 2016. – № 2 (71). – С. 62–66.
12. *Прунько І. Б.* Підвищення зносостійкості робочих поверхонь штоків гідравлічних нафтопромислових насосів нафтогазового технологічного транспорту: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Хмельницький, 2011. – 22 с.
13. *Трибологія* / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, С. В. Корбут. – К.: Нац. авіаційний ун-т, 2009. – 392 с.
14. *Kajdas C.* General Approach to Mechanochemistry and Its Relation to Tribochemistry. <http://dx.doi.org/10.5772/50507>.

Одержано 30.07.2019