

PACS numbers: 62.20.Qr, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 81.15.Rs

Комбіновані електроіскрові припрацювальні покриття бронзових деталей.

Частина 3. Трибологічні властивості

О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник*, В. С. Марцинковський*,
Є. В. Коноплянченко*, В. І. Мельник**, В. М. Власовець**,
Г. В. Кирик*, Н. В. Тарельник*, М. О. Мікуліна*, А. А. Кутах*,
А. Д. Поливаний*, М. М. Майфат*, О. М. Калнагуз*

*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

**Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондрат'єва, 160,
40021 Суми, Україна*

***Харківський національний технічний університет
сільськогосподарства імені Петра Василенка,
вул. Алчевських, 44,
61002 Харків, Україна*

У статті в результаті проведених досліджень вдосконалена технологія нанесення на бронзу BrO10C10 припрацювальних комбінованих електроіскрових покриттів (КЕП), сформованих у послідовності: S + Ag → Pb → S + Ag і S + Ag → Sn → S + Ag. Покриття, одержані за запропонованою тех-

Corresponding author: Vyacheslav Borysovych Tarelynyk
E-mail: tarelynyk@i.ua

*Sumy State University,
2 Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

**Sumy National Agrarian University,
160 Gerasym Kondratiev Str., UA-40021 Sumy, Ukraine*

***Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture,
44 Alchevskykh Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine*

Citation: O. P. Gaponova, V. B. Tarelynyk, V. S. Martsynkovskyy,
Ye. V. Konoplianchenko, V. I. Melnyk, V. M. Vlasovets, G. V. Kirik, N. V. Tarelynyk,
M. O. Mikulina, A. A. Kutakh, A. D. Polyvanyi, M. M. Mayfat, and A. N. Kalnaguz,
Combined Electrospark Running-in Coatings of Bronze Parts. Part 3. Tribological
Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 10: 1325–1334 (2021)
(in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.10.1325](https://doi.org/10.15407/mfint.43.10.1325).

нологією, містять сірку, що знижує схоплювання контактувальних поверхонь, мають достатню для подальшої механічної обробки товщину 0,19–1,31 мм. Трибологічними дослідженнями на тестері Т-01М за схемою «кулька–диск» встановлено, що зі збільшенням товщини КЕШ зростає сила тертя. У зразків з КЕШ ($S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$), товщина яких залежно від енергії розряду дорівнює 0,19; 0,26 і 1,01 мм, сила тертя становить 1,454; 1,762 і 2,543 Н відповідно, а у зразків з КЕШ ($S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$) товщиною 0,89; 1,05 і 1,31 мм відповідно 0,934; 1,904 і 2,152 Н. Сірка в КЕШ знижує силу тертя сталеві кульки по поверхні бронзових зразків на 19%. Для практичного застосування можна рекомендувати КЕШ ($S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$) і ($S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$), одержані за енергії розряду відповідно 0,52 \rightarrow 0,13 \rightarrow 0,05 і 4,6 \rightarrow 0,36 \rightarrow 0,36 Дж, які забезпечують зниження сили тертя порівняно зі зразками без покриття відповідно у 1,90 і 1,22 рази.

Ключові слова: бронза, припрацювальне покриття, комбіновані електроіскрові покриття, сульфидування, трибологічні випробування, сила тертя, коефіцієнт тертя.

In the article as a result of the research carried out the technology of applying on bronze BrO10S10 of running-in combined electrospark coatings (CEC), formed in the sequence: $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ and $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$ is improved. The coatings obtained by the proposed technology contain sulfur, which reduces the adhesion of the contacting surfaces and have a thickness of 0.19–1.31 mm sufficient for subsequent machining. Tribological studies on the T-01M tester according to the ‘ball–disk’ scheme have established that with an increase in the thickness of the CEC, the friction force increases. For samples with CEC ($S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$), the thickness of which depending on the discharge energy is 0.19; 0.26 and 1.01 mm, the friction force is 1.454; 1.762 and 2.543 N, respectively, and for samples with CEC ($S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$) 0.89; 1.05 and 1.31 mm respectively 0.934; 1.904 and 2.152 N. Sulfur in CEC reduces the friction force of a steel ball on the surface of bronze samples by 19%. For practical application, it is possible to recommend CEC ($S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$) and ($S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$) obtained at the discharge energy respectively 0.52 \rightarrow 0.13 \rightarrow 0.05 and 4.6 \rightarrow 0.36 \rightarrow 0.36 J, which provide a decrease in the friction force in comparison with uncoated samples respectively by 1.90 and 1.22 times.

Key words: bronze, running-in coating, combined electro-spark coatings, sulfiding, tribological tests, friction force, coefficient of friction.

(Отримано 4 березня 2021 р.; остаточн. варіант — 1 червня 2021 р.)

1. ВСТУП

У частині 1 статті [1] представлено результати досліджень якості поверхневих шарів (мікроструктури, мікротвердості, шорсткості і суцільності) зразків з бронзи BrO10S10 з комбінованими електроіскровими покриттями (КЕШ). Досліджували зразки трьох серій: 1-а

серія — без сульфидування, покриття, одержані у послідовності $\text{Ag} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Ag}$ і $\text{Ag} \rightarrow \text{Sn} \rightarrow \text{Ag}$; 2-а включала нанесення сірки у вигляді сірчаної мази на оброблювану поверхню перед срібленням $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$ і $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Sn} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$; 3-я включала нанесення сірчаної мази на оброблювану поверхню перед наступним етапом електроіскрового легування: $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{S} + \text{Pb} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$ і $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{S} + \text{Sn} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$.

Експериментально встановлено, що на зразках 1-ї серії зі збільшенням енергії розряду (W_p) збільшується товщина КЕІП з 0,27 до 2,9 мм, мікротвердість за цих обставин знаходиться в межах 80–140 і 130–183 МПа відповідно для покриттів з оливом і цинною, шорсткість $Rz = 8,5\text{--}10,0$ мкм. У зразків 2-ї серії зі збільшенням W_p товщина КЕІП збільшується з 0,19 до 1,3 мм, мікротвердість знаходиться в межах 80–180 МПа, причому її менші значення знаходяться ближче до поверхні, а шорсткість $Rz = 5,5\text{--}7,5$ мкм. Суцільність для всіх зразків становить 100%. КЕІП на зразках 3-ї серії руйнуються і їх не рекомендують застосовувати. Для практичного застосування рекомендують КЕІП ($\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$) і ($\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Sn} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$), товщини яких достатні для подальшого технологічного впливу будь-яким відомим способом (лезвийною обробкою, безабразивною ультразвуковою фінішною обробкою тощо).

У частині 2 статті [2] представлено результати подальших досліджень змін мікроструктури і складу поверхні зразків з бронзи БрО10С10 з КЕІП на растровому електронному мікроскопі, оснащеному системою локального рентгеноспектрального аналізу. Досліджували покриття, одержані у послідовності $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$ і $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Sn} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$. Встановлено, що для КЕІП характерна наявність елементів металів, що входять до складу електродів-інструментів (Ag , Pb і Sn). У покриттях, до складу яких входить оливо, зі збільшенням енергії розряду у разі легування як сріблом, так і оливом, збільшується дифузійна зона сірки і складає відповідно 90, 135 і 200 мкм. Сірка за глибиною шару розподіляється нерівномірно і міститься в кількості 1,59–3,3%. У випадку формування КЕІП на зразку з покриттям $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$ його товщина сягає 700 мкм. Сірку виявлено на поверхні і на відстані до 50 мкм, а також в перехідній зоні на відстані ~650 мкм від поверхні. Зі збільшенням енергії розряду в зразках з покриттям $\text{S} + \text{Ag} \rightarrow \text{Sn} \rightarrow \text{S} + \text{Ag}$ товщина нанесеного КЕІП досягає 1,05 і 1,310 мм. Сірку виявлено на поверхні, її дифузійна зона становить 200 мкм від поверхні, в перехідній зоні ~100 мкм.

У роботі [3] представлено результати дослідження трибологічних властивостей бронзових зразків після випробувань за схемою «кулька-диск». В результаті встановлено, що КЕІП, сформовані в різних комбінаціях зі срібла, олива і міді, знижують силу тертя до 20%. Недоліком таких покриттів є мала їхня товщина 20–30 мкм,

оскільки поверхні з КЕП з метою зменшення шорсткості піддавали подальшій механічній обробці.

Резервом для підвищення параметрів якості покриттів, сформованих методом ЕІЛ, можуть бути комбіновані технології, які здійснюють шляхом поєднання його з іншими технологічними методами, застосовуваними для поліпшення трибологічних властивостей поверхонь. Так у [4–8] рекомендовано після ЕІЛ застосовувати поверхневе пластичне деформування або безабразивну ультразвукову фінішну обробку, в [9–11] лазерну обробку, а в [12–15] для зменшення шорсткості поверхонь після ЕІЛ такими електродними матеріалами як мідь, срібло, нікель, титан та інші рекомендовано використовувати графіт як катод у разі ЕІЛ на заключних операціях обробки.

У зв'язку з тим, що КЕП, які містять сірку, рекомендовані як припрацювальні у вузлах тертя, виникає необхідність у проведенні порівняльних трибологічних випробувань.

Таким чином, метою цієї роботи є дослідження впливу режимів ЕІЛ і складу КЕП на трибологічні властивості зразків з бронзи БрО10С10.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Трибологічні властивості одержаних покриттів визначали на тестері Т-01М, виготовленому Інститутом технології Радом (Польща) відповідно до стандарту DIN-50324: 1992-07 Tribology за схемою «кулька–диск» (див. частину 1 [1], рис. 1).

Зразки для досліджень (диски) представляли собою кільця розміром 42×25×6 мм, виготовлені з бронзи БрО10С10 (рис. 1). Твердість основи після термічної обробки становила 1235 МПа.

Кульку діаметром 6,3 мм, виготовлену з матеріалу 100Cr6 (табл. 1), змінювали після кожного випробування.

Випробовували наступні серії зразків (табл. 2).

З метою забезпечення сульфидування поверхні на оброблювані ділянки наносили сірчану мазь з концентрацією сірки 33,3% перед



Рис. 1. Кільця (диски) для трибологічних досліджень КЕП.

Fig. 1. Rings (discs) for tribological studies CEC.

ТАБЛИЦЯ 1. Склад матеріалу кульки.

TABLE 1. Ball material composition.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S max	P max
Min	0,95	0,15	0,20	1,35	–	–	–	–
Max	1,10	0,35	0,40	1,60	0,10	0,40	0,025	0,025

срібленням (див. табл. 2). Крім цього досліджували зразок № 0 — без покриття та № 7 з КЕІП $Ag \rightarrow Pb \rightarrow Ag$.

Зразки перед кожним випробуванням змащували краплею парафінового масла. У процесі випробувань реєстрували силу тертя F_t .

У процесі досліджень використовували наступні робочі параметри тестера: швидкість обертання $\omega = 353$ об/хв; лінійна швидкість $v = 0,67$ м/с; відстань ковзання $S = 300$ м; навантаження $F_n = 1,0$ кг (9,81 Н); тип тертя — сухе тертя (без змащення).

3. РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 2 показано характер зміни сили тертя для всіх зразків з КЕІП у разі проходження сталеву кулькою шляху тертя $S = 300$ м з навантаженням $F_n = 9,81$ Н. Для даних пар тертя в табл. 3 представлено середні сили тертя F_t і коефіцієнти тертя μ .

Проаналізувавши рис. 2 і дані табл. 3, можна відзначити:

- у зразка без покриття (№ 0) сила тертя з моменту початку шляху тертя до його завершення плавно зростає;
- у зразка № 1 товщиною КЕІП 0,19 мм з шорсткістю $Rz = 7,5$ мкм сила тертя спочатку плавно зростає, а потім після проходжен-

ТАБЛИЦЯ 2. Режими і послідовність легування зразків з КЕІП для трибологічних випробувань.

TABLE 2. Modes and sequence of alloying samples with CEC for tribological tests.

№ зразка	КЕІП	
	Послідовність легування	Енергія розряду W_p , Дж
0	Без покриття	–
1	S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag	0,52 \rightarrow 0,13 \rightarrow 0,05
2	S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag	0,9 \rightarrow 0,36 \rightarrow 0,36
3	S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag	4,6 \rightarrow 4,6 \rightarrow 0,36
4	S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag	4,6 \rightarrow 0,36 \rightarrow 0,36
5	S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag	4,6 \rightarrow 0,9 \rightarrow 0,36
6	S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag	4,6 \rightarrow 4,6 \rightarrow 0,36
7	Ag \rightarrow Pb \rightarrow Ag	0,9 \rightarrow 0,36 \rightarrow 0,36

ня шляху тертя ~ 200 м стабілізується на одному рівні;

– у зразків № 2 і № 3 збільшення товщини КЕІП до 0,26 і 1,01 мм і шорсткості (Rz) до 8,5 і 10,0 мкм відповідно супроводжується не тільки зростанням сили тертя, а й появою вібрації, що відображено на рисунку кривої залежності сили тертя від шляху у вигляді коливань. Сила тертя, як і амплітуда коливань з моменту початку шляху тертя до його завершення, знижуються, що свідчить про період

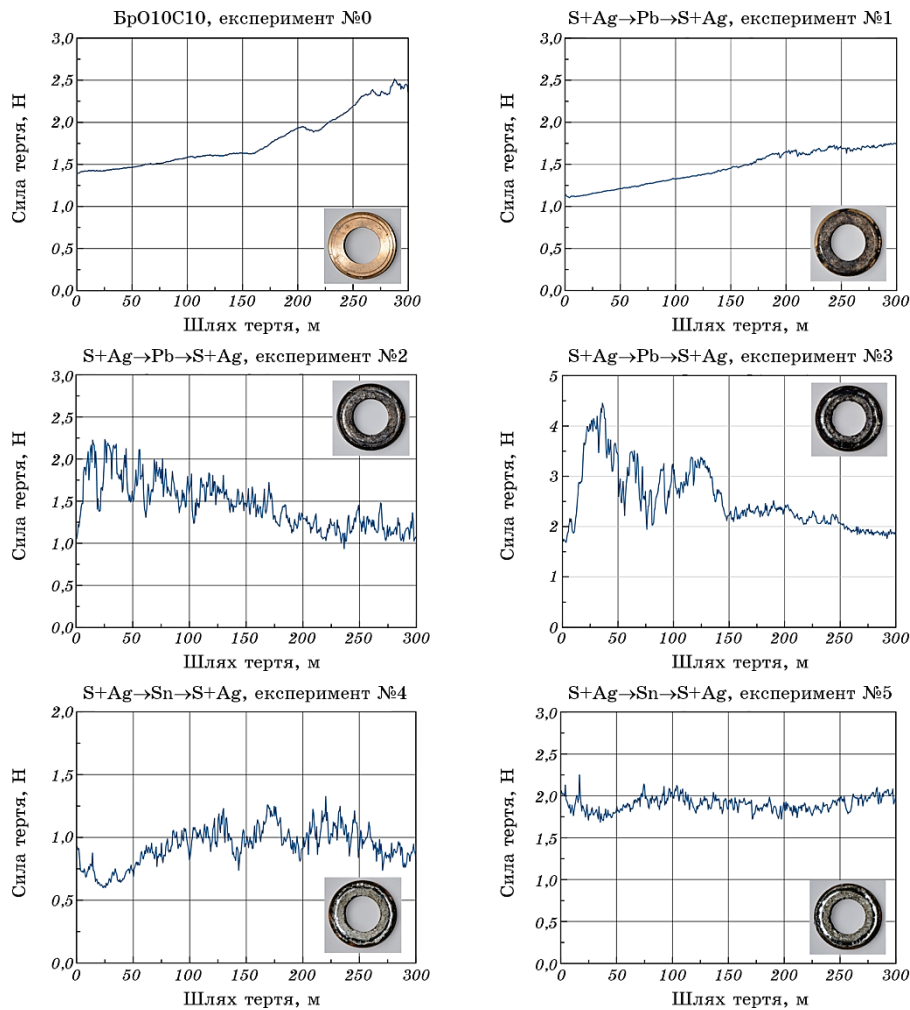
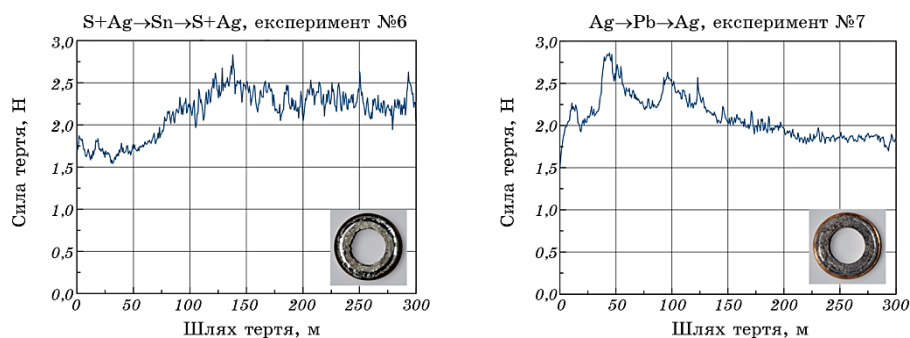


Рис. 2. Характер зміни сили тертя F_t сталеві кульки по поверхні бронзового диска з КЕІП.

Fig. 2. The nature of the change in the friction force F_t of a steel ball on the surface of a bronze disc with CES.



Продовження рис. 2.

Continuation of Fig. 2.

припрацювання;

– для зразків № 4 і № 6 характерне незначне збільшення сили тертя на початку випробувань, потім зниження і стабілізація відповідно на рівні 0,9 і 2,2 Н;

– у зразка № 5 сила тертя на всьому шляху тертя знаходиться на рівні ~2,0 Н;

– найменші коефіцієнти тертя складають 0,095 і 0,148 відповідно для зразків № 4 і № 1, а найбільші 0,259 і 0,219 відповідно для зразків № 3 і № 6;

– сила тертя зразків з КЕІП, до складу яких входить сірка, нижче, ніж без неї (див. зразки № 2 і № 7).

На рисунку 3 представлено діаграму, що дозволяє порівняти си-

ТАБЛИЦЯ 3. Сила тертя і коефіцієнт тертя сталеві кульки по поверхні бронзового диска з КЕІП.

TABLE 3. Modes and sequence of alloying samples with CEC for tribological tests.

№ експерименту	КЕІП	Сила тертя, F_t , Н	Коефіцієнт тертя $\mu = F_t/F_n$
0	Без покриття (BrO10C10)	1,779	0,181
1	S + Ag → Pb → S + Ag	1,454	0,148
2	S + Ag → Pb → S + Ag	1,762	0,179
3	S + Ag → Pb → S + Ag	2,543	0,259
4	S + Ag → Sn → S + Ag	0,934	0,095
5	S + Ag → Sn → S + Ag	1,904	0,194
6	S + Ag → Sn → S + Ag	2,152	0,219
7	Ag → Pb → Ag	2,098	0,214

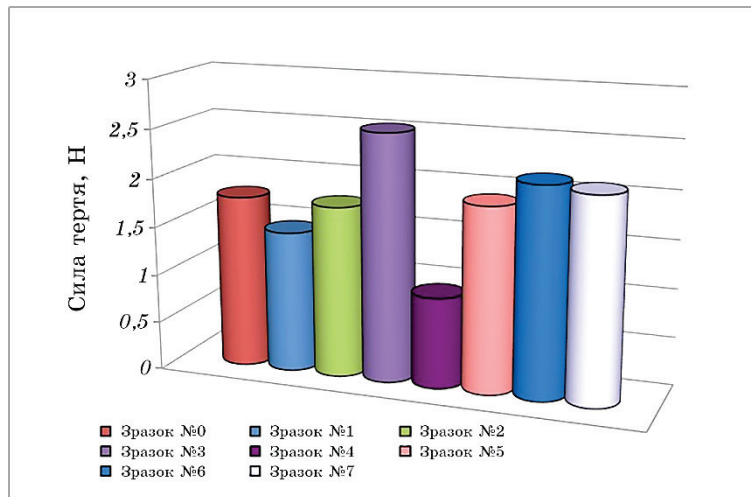


Рис. 3. Порівняльні діаграми зміни сил тертя для всіх серій зразків за навантаження 9,81 Н.

Fig. 3. Comparative diagrams of changes in friction forces for all series of samples under a load of 9.81 N.

ли тертя всіх серій зразків.

4. ВИСНОВКИ

1. Літературний аналіз результатів трибологічних промислових випробувань припрацювальних КЕП з м'яких антифрикційних металів (срібла, міді, цини і олова), сформованих у різній послідовності, показав, що їхньої товщини 20–30 мкм недостатньо, оскільки після наступної механічної обробки, що проводиться з метою підвищення якості поверхні (зниження шорсткості, нерівномірності нанесення по товщині і суцільності), одержаний припрацювальний шар знімають.

2. У результаті проведених експериментальних досліджень вдосконалено технологію нанесення на бронзу БрО10С10 припрацювальних КЕП, одержаних у послідовності $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$. Показано, що наявність сірки в покритті сприяє зниженню схоплювання контактувальних поверхонь. Запропонована технологія одержання КЕП дозволяє забезпечити товщину покриття 0,19–1,31 мм, що спрощує подальшу механічну обробку поверхонь.

3. Трибологічними дослідженнями на тестері Т-01М за схемою «кулька–диск» встановлено, що зі збільшенням товщини КЕП зростає сила тертя. У зразків $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$, товщина яких залежно від енергії розряду дорівнює відповідно

0,19; 0,26; 1,01 мм і 0,89; 1,05; 1,31 мм, сила тертя становить відповідно 1,454; 1,762; 2,543 Н і 0,934; 1,904 і 2,152 Н.

4. Сірка в КЕІП знижує силу тертя сталеві кульки по поверхні бронзових зразків на 19%. До практичного застосування можна рекомендувати КЕІП: $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$, одержані за енергії розряду відповідно $0,52 \rightarrow 0,13 \rightarrow 0,05$ і $4,6 \rightarrow 0,36 \rightarrow 0,36$ Дж, що забезпечують зниження сили тертя порівняно зі зразками без покриття відповідно у 1,90 і 1,22 рази.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, Є. В. Коноплянченко, В. І. Мельник, В. М. Власовець, О. А. Саржанов, Н. В. Тарельник, М. О. Мікуліна, А. Д. Поливаний, Г. В. Кирик, А. Б. Баталова, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 8: 1125 (2021).
2. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, Є. В. Коноплянченко, В. І. Мельник, В. М. Власовець, Н. В. Тарельник, В. О. Герасименко, С. Г. Бондарев, А. Б. Баталова, Г. В. Кирик, А. Д. Поливаний, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 9: 1159 (2021).
3. V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, A. Zhukov, and P. Kurp, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering (June 16, 2018, Ukraine)* (Springer: 2018), p. 382.
4. А. И. Михайлюк, Л. С. Рапопорт, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 1: 16 (1991).
5. А. И. Михайлюк, Л. С. Рапопорт, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 2: 17 (1991).
6. А. И. Михайлюк, А. Н. Иванов, Л. М. Капушкина, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 1: 19 (1995).
7. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковський, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 1: 47 (2019).
8. V. Tarel'nyk and V. Martsynkovskyy, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 397 (2014).
9. S. Adamczak, S. Kundera, and J. Swiderski, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233** (1): 012031 (2017).
10. A. Zahorulko, S. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233** (1): 012039 (2017).
11. B. Antoszewski and V. Tarel'nyk, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 301 (2014).
12. Н. И. Лазаренко, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Москва: Машиностроение: 1976).
13. В. В. Михайлов, А. Е. Гитлевич, А. Д. Верхотуров, А. И. Михайлюк, А. В. Беляков, Л. А. Коневцов, *Электронная обработка материалов*, **49** (5): 21 (2013).
14. В. В. Михайлов, Е. А. Пасинковский, К. А. Бачу, П. В. Перетятку, *Электронная обработка материалов*, № 3: 106 (2006).
15. V. V. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsynkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **54**: 147 (2018).

REFERENCES

1. O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, V. S. Martsynkovskyy, Ie. V. Konoplianchenko, V. I. Melnyk, V. M. Vlasovets, O. A. Sarzhanov, N. V. Tarel'nyk, M. O. Mikulina, A. D. Polyvanyi, G. V. Kirik, and A. B. Batalova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1121 (2021) (in Ukrainian).
2. O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, V. S. Martsynkovskyy, Ie. V. Konoplianchenko, V. I. Melnyk, V. M. Vlasovets, N. V. Tarel'nyk, V. O. Gerasimenko, S. G. Bondarev, A. B. Batalova, G. V. Kirik, and A. D. Polyvanyi, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 9: 1155 (2021) (in Ukrainian).
3. V. Tarel'nyk, Ie. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, A. Zhukov, and P. Kurp, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering (June 16, 2018, Ukraine)* (Springer: 2018), p. 382.
4. A. I. Mikhaylyuk, L. S. Rapoport, and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 1: 16 (1991) (in Russian).
5. A. I. Mikhaylyuk, L. S. Rapoport, and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 2: 17 (1991) (in Russian).
6. A. I. Mikhaylyuk, A. N. Ivanov, L. M. Kapushkina, and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 1: 19 (1995) (in Russian).
7. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarel'nyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47 (2019) (in Russian).
8. V. Tarel'nyk and V. Martsynkovskyy, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 397 (2014).
9. S. Adamczak, C. Kundera, and J. Swiderski, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233** (1): 012031 (2017).
10. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **233** (1): 012039 (2017).
11. B. Antoszewski and V. Tarel'nyk, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 301 (2014).
12. N. I. Lazarenko, *Elektroiskrovoe Legirovanie Metallicheskih Poverkhnostey* (Moscow: Mashinostroyeniye: 1976) (in Russian).
13. V. V. Mikhaylov, A. Ye. Gitlevich, A. D. Verkhoturov, A. I. Mikhaylyuk, A. V. Belyakov, and L. A. Konevtsov, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **49** (5): 21 (2013) (in Russian).
14. V. V. Mikhaylov, Ye. A. Pasinkovskiy, K. A. Bachu, and P. V. Peretyatku, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 3: 106 (2006) (in Russian).
15. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsynkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **54**: 147 (2018).