

PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

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

Комбіновані електроіскрові припрацювальні покриття бронзових деталей.

Частина 1. Структура і механічні властивості

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. Поливаній*, Г. В. Кирик, А. Б. Баталова*

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

**Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160,
40021 Суми, Україна*

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

У статті представлено результати досліджень якості поверхневих шарів (мікроструктури, мікротвердості, шорсткості та суцільності) зразків з бронзи БрО10С10 з комбінованими електроіскровими покриттями. Досліджено покриття трьох серій: 1) без сульфидування ($\text{Ag} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Ag}$ і

Corresponding author: Vyacheslav Borysovykh Tarel'nyk
E-mail: tarel'nyk@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. Tarel'nyk, V. S. Martsynkovskyy,
Ye. 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,
Combined Electrospray Running-in Coatings of Bronze Parts. Part 1. Structure and
Mechanical Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1121–1138 (2021)
(in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.08.1121](https://doi.org/10.15407/mfint.43.08.1121).

Ag → Sn → Ag), 2) з нанесенням сірки у вигляді сірчаної мазі на оброблювану поверхню до сріблення ($S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$), 3) з нанесенням сірчаної мазі на оброблювану поверхню перед наступним етапом електроіскрового легування ($S + Ag \rightarrow S + Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow S + Sn \rightarrow S + Ag$). Встановлено, що на зразках першої серії зі збільшенням енергії розряду (W_p) зростає товщина комбінованих електроіскрових покриттів з 0,27 до 2,9 мм, водночас мікротвердість знаходиться в межах 80–140 і 130–183 МПа відповідно для покриттів зі свинцем і циною, шорсткість $Rz = 8,5\text{--}10,0$ мкм. У зразків другої серії зі збільшенням W_p товщина комбінованих електроіскрових покриттів зростає від 0,19 до 1,3 мм, мікротвердість знаходиться в межах 80–180 МПа, а шорсткість $Rz = 5,5\text{--}7,5$ мкм. Суцільність для всіх зразків становить 100%. Показано, що комбіновані електроіскрові покриття на зразках третьої серії руйнуються. Для практичного застосування рекомендовано комбіновані електроіскрові покриття, сформовані в послідовності $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$, товщини яких достатньо для подальшого технологічного впливу будь-яким відомим способом (лезовою обробкою, безабразивною ультразвуковою фінішною обробкою та ін.).

Ключові слова: бронзовий підшипник, припрацювальне покриття, комбіновані електроіскрові покриття, сила тертя, зношення.

The article presents the results of studies of the surface layers' quality (microstructure, microhardness, roughness, and continuity) of BrO10S10 bronze specimens with combined electrospark coatings (CEC). The coatings of three series are investigated: the 1st series prepared without sulfurizing ($Ag \rightarrow Pb \rightarrow Ag$ and $Ag \rightarrow Sn \rightarrow Ag$), the 2nd—included a deposition of sulphur in the form of a sulphuric ointment to the surface to be treated before silvering ($S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ and $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$), and the 3rd—included the application of sulphuric ointment to the surface to be treated before the next stage of electrospark alloying ($S + Ag \rightarrow S + Pb \rightarrow S + Ag$ and $S + Ag \rightarrow S + Sn \rightarrow S + Ag$). As found, on samples of the 1st series, with an increase in the discharge energy (W_p), the thickness of the CEC increases from 0.27 to 2.9 mm, while the microhardness is in the range of 8–140 and 130–183 MPa for coatings with lead and tin, respectively, roughness $Rz = 8.5\text{--}10.0$ μm. For samples of the 2nd series, with an increase in W_p , the thickness of the CEC increases from 0.19 to 1.3 mm, the microhardness is in the range of 80–180 MPa, and the roughness $Rz = 5.5\text{--}7.5$ μm. The continuity for all samples is 100%. As shown, the CECs on samples of the 3rd series are destroyed. The CECs formed in the sequence $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ and $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$ are recommended for practical application, if their thickness is sufficient for subsequent technological impact by any known method (blade treatment, non-abrasive ultrasonic finishing, etc.).

Key words: bronze bearing, running-in coating, combined electrospark coatings, friction force, wear.

(Отримано 4 березня 2021 р.; остаточн. варіант — 28 травня 2021 р.)

1. ВСТУП

Постійне вдосконалення техніки супроводжується збільшенням режимних параметрів машин і механізмів. Особливої досконалості до того ж домоглися роторні машини та механізми, діапазон параметрів яких вражає уяву. Проектування відповідальних вузлів для забезпечення необхідних динамічних характеристик роторних систем сучасних швидкохідних компресорів, газових і парових турбін та інших агрегатів, пов'язане з вирішенням складних і актуальних завдань, спрямованих на збільшення термінів їхньої служби, що безпосередньо залежить від підвищення зносостійкості і надійності вузлів тертя.

У промисловості для пар тертя активно використовують бабіти, що мають унікальні технічні характеристики, відрізняються хорошими антифрикційними якостями і високою стійкістю до зносу. Крім бабітів застосовують й інші антифрикційні матеріали. Зміна типу і марок стопів відбувається під впливом умов роботи вузлів тертя. Істотним недоліком бабітів є їхній малий опір втомі, особливо за температур понад 100°C . Зі зменшенням товщини заливки підшипника опір втомі збільшується [1, 2].

Стопи на основі міді володіють більш високими механічними характеристиками порівняно з бабітами, а також стопами на основі цинку й алюмінію. Деталі з мідних стопів (бронзи) знайшли широке застосування у машинобудуванні, авіаційній і ракетній техніці, харчовій, хемічній, нафтогазовій та інших галузях промисловості. Легуючі елементи, що входять до складу мідних стопів впливають на властивості бронзи. Трикомпонентна циниста свинецьовмісна бронза марки БрО10С10, завдяки цині і свинцю володіє, відповідно, підвищеними характеристиками міцності і триботехнічними властивостями. Найважливішою практичною властивістю свинецьовмісних цинистих бронз є їхній дуже низький коефіцієнт тертя по загартованій сталі [3, 4].

Слід зазначити, що у разі виготовлення пар тертя завжди є відхилення від ідеальної геометричної форми, які називають похибками. Додаткові неточності вносять у разі установки деталей. Накопичення похибок значно знижує реальну площу контактуючих поверхонь, що є причиною перенапруження антифрикційного шару, особливо в період припрацювання, у вигляді ускладненого припрацювання, коли пошкоджуваність проявляється у підвищенні зносу і великої ймовірності утворення задира.

Таким чином, для компенсації похибок і підвищення площі контакту між контактуючими поверхнями у разі тертя до необхідного рівня, виникає необхідність формування на них спеціальних покриттів, що поліпшують умови припрацювання. Створення поверхневих шарів з особливими властивостями для деталей вузлів тертя

ковзання, обумовлює важливість і актуальність проблеми, а також необхідність її вирішення.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Антифрикційні властивості пар тертя залежать від поєднання матеріалів контактуючих деталей і мастила. У [5] проблему зниження зношування підшипників ковзання в суднових двигунах внутрішнього згоряння вирішили за рахунок поліпшення триботехнічних властивостей моторних масел. Згідно [6, 7] одним з найбільш перспективних напрямків зниження зносу тертьових сполучень є застосування металоплакувальних мастильних матеріалів, які забезпечують одержання антифрикційної плівки на поверхнях тертя. З метою підвищення триботехнічних характеристик для виготовлення та ремонту багатьох деталей на шар бронзи наносять припрацювальне покриття з бабіту йонно-плазмовим методом [8, 9]. У [10] описано результати дослідження електроосаджених покриттів стопом SnSbCu за хемічним складом близьким до бабіту Б83. Одержані покриття мають високу зносостійкість на етапі припрацювання. Згідно [11] у парах тертя за високих навантажень і швидкостей застосовують срібло, а його антифрикційні властивості покращують присадки невеликої кількості свинцю.

З метою підвищення експлуатаційних характеристик цинистих бронз в останні роки застосовують такі прогресивні методи підвищення механічних і службових властивостей матеріалів як лиття під тиском [12], селективне лазерне топлення [13], наноструктурування [14–17], порошкову металургію [18–20], створення різних металоматричних композицій [21–26] і т.д.

Для нанесення антифрикційних покриттів досить перспективним є метод електроіскрового легування (ЕІЛ), який все ширше використовують у промисловості [27–31].

Комплекс позитивних специфічних особливостей методу ЕІЛ, в першу чергу таких, як можливість нанесення на металеві поверхні будь-яких струмопровідних матеріалів, які міцно з'єднують з основою, проведення процесу легування в локальному місці, відсутність жолоблення і викривлення виробу стимулюють його все більшому застосуванню для підвищення якості пар тертя [32, 33].

Одним з основних переваг методу ЕІЛ є те, що він дозволяє здійснювати почергове легування металевих поверхонь окремо взятими електродами і таким чином формувати на них квазібагатошарові комбіновані електроіскрові покриття (КЕІП), що володіють необхідними властивостями [34–37]. Розширення можливостей ЕІЛ є поєднання його з іншими зміцнювальними технологіями [38–40].

Срібло має високі механічні й антикорозійні властивості, але як антифрикційний метал його не можна вважати цілком задовіль-

ним. Антифрикційні властивості срібла поліпшуються від присадки невеликої кількості свинцю. Срібло застосовують в парах тертя для високих навантажень і швидкостей [41, 42].

У [43] проводили лабораторні трибологічні дослідження бронзових зразків за схемою «кулька–диск». В результаті було встановлено, що КЕП зі срібла, свинцю та міді, сформовані на зразках з БрО10С10, знижують силу тертя на 20%. Однак, нанесення КЕП не забезпечило в умовах виробництва значного поліпшення характеру припрацювання. Поверхня бронзової деталі продовжувала прискорено зношуватися. Очевидно, товщини КЕП, що складала 20–30 мкм, було недостатньо для компенсації похибок і підвищення площі контакту між сталевую і бронзовою деталлю до необхідного рівня, що стало причиною перенапруження антифрикційного шару в період припрацювання.

Для запобігання схоплювання контактуючих поверхонь у разі тертя ковзання нами запропонований екологічно безпечний спосіб сульфидування, здійснюваний методом ЕІЛ [44].

Таким чином, метою роботи є підвищення трибологічних властивостей поверхонь бронзових деталей, що входять до трибосполучень, шляхом вдосконалення технології нанесення на них КЕП з м'яких антифрикційних металів за рахунок додаткового сульфидування.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення металографічних і дюрOMETричних досліджень припрацювальних покриттів, які наносили методом ЕІЛ, з бронзи БрО10С10 твердістю 235 МПа виготовляли зразки розміром $15 \times 15 \times 6$ мм³. До цього як матеріал електродів використовували срібло (Ср 999), свинець (С1) і цина (О1).

З метою визначення впливу сульфидування на якісні параметри сформованого поверхневого шару на бронзі БрО10С10, виготовляли три серії зразків № 1–6, зміцнених згідно табл. 1:

серія 1 — без використання сірки;

серія 2 — сірку у вигляді сірчаної мазі з концентрацією сірки 33,3% наносили на оброблювану поверхню до сріблення $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$;

серія 3 — сірка у вигляді сірчаної мазі наносили на оброблювану поверхню перед кожним етапом електроіскрового легування $S + Ag \rightarrow S + Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow S + Sn \rightarrow S + Ag$.

Шорсткість поверхні після ЕІЛ визначали на приладі профілографі-профілометрі мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття і обробки профілограм. Металографічний аналіз покриттів виконували за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-7, дюрOMETричні дослідження — на приладі ПМТ-3 за стандартними методиками.

ТАБЛИЦЯ 1. Характеристики процесу формування припрацювальних КЕІП на підкладках із бронзи BrO10S10.**TABLE 1.** Characteristics of the formation process of running-in CEC on substrates made of bronze BrO10S10.

№ зразка	Матеріал електрода	Установка ЕІЛ	Енергія розряду W_p , Дж
1	Срібло	«Елітрон-22А»	0,52
	Свинець	«Елітрон-22А»	0,13
	Срібло	«Елітрон-22А»	0,05
2	Срібло	«Елітрон-22А»	0,9
	Свинець	«Елітрон-52А»	0,36
	Срібло	«Елітрон-52А»	0,36
3	Срібло	«Елітрон-52А»	4,6
	Свинець	«Елітрон-52А»	4,6
	Срібло	«Елітрон-52А»	0,36
4	Срібло	«Елітрон-52А»	4,6
	Цина	«Елітрон-52А»	0,36
	Срібло	«Елітрон-52А»	0,36
5	Срібло	«Елітрон-52А»	4,6
	Цина	«Елітрон-52А»	0,9
	Срібло	«Елітрон-52А»	0,36
6	Срібло	«Елітрон-52А»	4,6
	Цина	«Елітрон-52А»	4,6
	Срібло	«Елітрон-52А»	0,36

Розподіл елементів у поверхневому шарі визначали на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106 з камерою низького вакууму і системою енергодисперсійного мікроаналізу. Встановлений на приладі детектор XR-100FASTSDD фірми Amptek (США) дозволяв проводити якісний і кількісний елементний аналізи областей досліджуваного об'єкта.

Трибологічні властивості припрацювальних покриттів визначали на тестері Т-01М за схемою «кулька–диск» (рис. 1). Зразками для досліджень були кільця розміром $42 \times 25 \times 6$ мм³, виготовлені з бронзи BrO10S10. Сірчану мазь з концентрацією сірки 33,3% наносили у разі формування КЕІП перед кожним легуванням сріблом у послідовності і за енергії розряду згідно табл. 1 для зразків № 1–6. Крім цього досліджували зразок № 0 — без покриття та № 7 з КЕІП, одержаним у послідовності Ag → Pb → Ag за енергій розряду відповідно 0,9, 0,36 і 4,6 Дж.

Кульку діаметром 6,3 мм, виготовлену з матеріалу 100Cr6, змінювали після кожного випробування. Зразки перед кожним збільшенням навантаження змащували краплею парафінового масла. В

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 ДОСЛІДЖЕНЬ

У разі нанесення на зразок № 1 срібла шорсткість поверхні (Rz) становить 8,5 мкм, а суцільність 60%. У разі подальшого ЕІЛ свинцем шорсткість поверхні зростає до $Rz = 29$ мкм, а суцільність до 70%. Подальше ЕІЛ сріблом сприяє зниженню шорсткості поверхні до 7,5 мкм і збільшення суцільності покриття до 100%, що очевидно пов'язано зі вторинним розтопленням свинцю в зв'язку з його низькою температурою топлення, розтіканням його по поверхні і заповненням всіх нерівностей і шорсткостей.

Мікроструктурний аналіз зразка, легованого в послідовності $Ag \rightarrow Pb \rightarrow Ag$ (зразок № 1), показав, що КЕП складаються з 4-х ділянок (рис. 2, а): зовнішній — темний, нерівномірний за товщиною близько 100–150 мкм, місцями до 170 мкм і мікротвердістю 81–91 МПа; світлий — нерівномірний і не суцільний шар, товщина якого коливається в межах 5–10 мкм; зона термічного впливу (ЗТВ) ~100 мкм з мікротвердістю ~2200 МПа; основний метал. Мікроструктура основного металу бронзи БрО10С10 являє собою однорідні зерна α -твердого розчину олова в міді — темна складова, евтектида ($\alpha + Cu_{31}Sn_8$) — світла і включення свинцю [45]. Мікротвердість основи становить 1235 МПа.

Зі збільшенням енергії розряду (табл. 1) у разі нанесення КЕП на поверхню зразка № 2, товщина темного шару на окремих ділянках досягає 250 мкм (рис. 2, б), а шорсткість знаходиться на тому ж рівні. Товщина світлого шару збільшується до 20 мкм. Нижче світло-

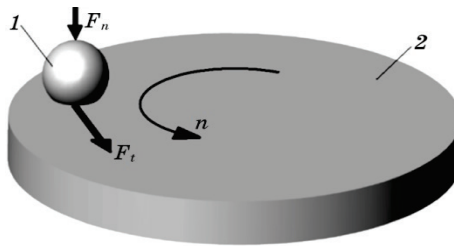


Рис. 1. Схема пари тертя трибологічного тестера Т-01М: 1 — кулька, 2 — диск.

Fig. 1. Scheme of the friction pair of the tribological tester T-01M: 1—ball, 2—disc.

го шару розташована зона термічного впливу (ЗТВ), товщина якої досягає 150 мкм з мікротвердістю до 2500 МПа.

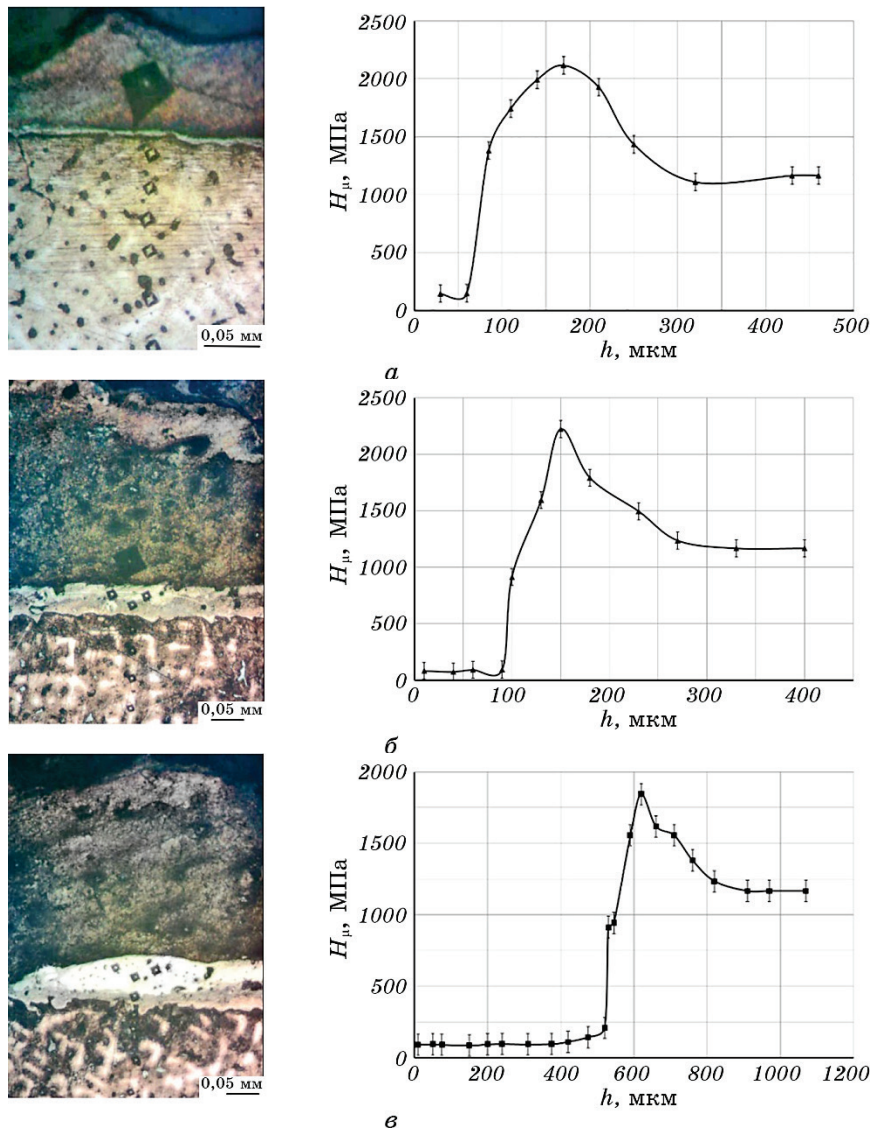


Рис. 2. Мікроструктура після травлення в солянокислomu розчині хлорного заліза і розподіл мікротвердості поверхневого шару зразків: *a* — № 1, *б* — № 2, *в* — № 3.

Fig. 2. Microstructure after etching in a hydrochloric solution of ferric chloride and the distribution of surface layer microhardness of the samples: *a*—No. 1, *б*—No. 2, *в*—No. 3.

Зі зростанням енергії розряду (зразок № 3) у разі нанесення першого шару (срібла) і другого шару (свинцю) відповідно від 0,9 і 0,36 до 4,6 Дж формується досить масивний (до 830 мкм) темний шар з шорсткістю до 10,0 мкм, суцільністю до 100% і мікротвердістю 80–100 МПа, а в місцях, прилеглих до світлого шару, до 200 МПа. Нижче розташований світлий шар товщиною 30–40 мкм з мікротвердістю 1150–858 МПа (рис. 2, в).

У разі заміни матеріалу електрода зі свинцю на цину для одержання КЕІП (зразки 4–6) у всіх випадках перший шар (срібло) наносили за $W_p = 4,6$ Дж. У разі нанесення другого шару (олова) енергія розряду для зразків № 4–6 збільшувалася і становила 0,36, 0,9 і 4,6 Дж відповідно. Третій шар (срібло) наносили за $W_p = 4,6$ Дж, його застосовували для збільшення суцільності покриття і зниження шорсткості поверхні.

Проведений металографічний аналіз показав, що для всіх зразків характерні 4 ділянки — зовнішній шар, світлий підшар, нижче дифузійна зона (зона ЗТВ) і основний метал.

По мірі зростання енергії розряду 0,36, 0,9 і 4,6 Дж у разі нанесення олова методом ЕІЛ (рис. 3) збільшується мікротвердість світлого підшару і становить 1525, 1636 і 2383 МПа відповідно. Товщина темного шару зі зниженою мікротвердістю збільшується до 0,67, 1,75 і 2,74 мм відповідно. У ЗТВ, глибина якої досягає відповідно 1400, 2100 і 3100 мкм, розташовується шар, мікротвердість якого нижче мікротвердості основи і становить 800, 900 і 750 МПа, що пов'язане з майже у два рази більшою теплопровідністю олова в порівнянні зі свинцем і як результат зниження мікротвердості внаслідок відпустки [46]. Шорсткість поверхні для всіх зразків практично не змінюється і знаходиться в межах 8,5–10,0 мкм.

Проведений металографічний аналіз зразків серії 2, на оброблювану поверхню яких наносили сірку перед срібленням $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$, не показав суттєвих відмінностей у структурі сформованих КЕІП. Відмінністю є зниження товщини покриття, як у разі нанесення другого шару свинцю, або олова, так і всього КЕІП, а також зниження шорсткості до $Rz = 5,5$ –7,5 мкм. Результати параметрів якості КЕІП серій 1 і 2 зведені до табл. 2.

В результаті аналізу таблиці встановлено, що у зразків без сульфидування зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина шару, суцільність становить 100%, а мікротвердість знаходиться в межах 80–140 і 130–183 МПа відповідно для КЕІП зі свинцем і циною. Товщина світлого підшару змінюється незначно і перебуває в межах 10–40 і 10–25 мкм, а мікротвердість 912–1150 і 1228–2383 МПа відповідно для КЕІП зі свинцем і циною. Товщина зміцненого шару зі збільшенням енергії розряду зростає і знаходиться в межах 80–230 і 70–120 мкм відповідно для КЕІП зі свинцем і циною. Мікротвердість зміцненого шару КЕІП для всіх зразків змінюється незначно і знаходиться в межах 1313–2383 МПа.

У зразків серії 2 зі збільшенням W_p збільшується товщина шару, суцільність становить 100%, а мікротвердість знаходиться в межах 80–130 і 130–150 МПа відповідно для КЕП зі свинцем і циною.

Товщина світлого підшару змінюється незначно і знаходиться в

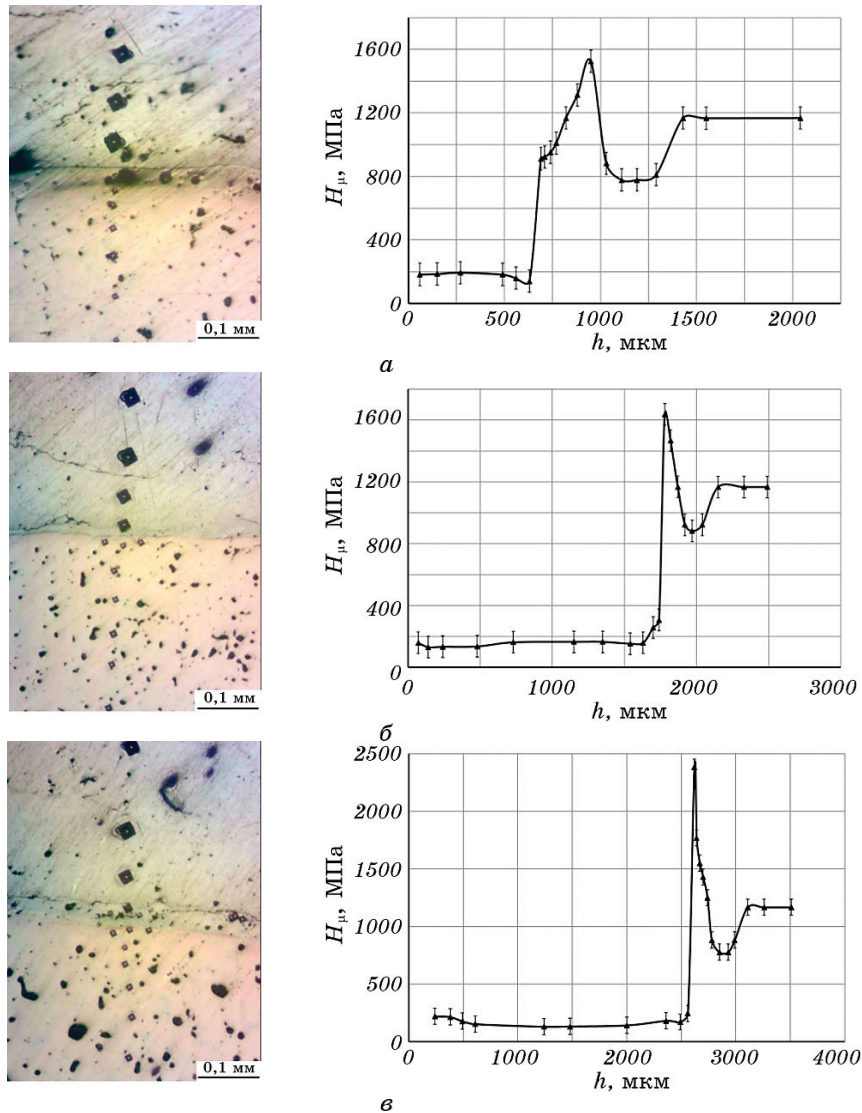


Рис. 3. Мікроструктура (без травлення) і розподіл мікротвердості поверхневого шару зразків: *a* — № 4, *б* — № 5, *в* — № 6.

Fig. 3. Microstructure (without etching) and distribution of surface layer microhardness of the samples: *a*—No. 4, *б*—No. 5, *в*—No. 6.

ТАБЛИЦЯ 2. Зведена таблиця параметрів якості КЕІП зразків серій 1 і 2.**TABLE 2.** Summary Table of quality parameters of CEC samples 1st and 2nd series.

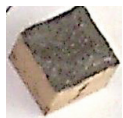
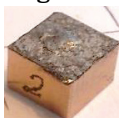



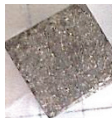


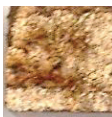

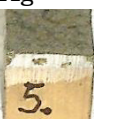



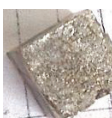



Зразок	Товщина зовнішнього шару, мкм	Мікротвердість зовнішнього шару, МПа	Суцільність зовнішнього шару, %	Товщина світлого підшару, мкм	Мікротвердість світлого підшару, МПа	Суцільність світлого підшару, %	Шорсткість поверхні, Rz, мкм	Товщина зміцненого шару, мкм	Мікротвердість зміцненого шару, МПа
Ag → Pb → Ag									
№ 1	100–170	81–91	100	до 10	–	50–60	8,5	80	1494–2230
№ 2	150–250	90–140	100	до 10	912	70–80	7,5	165	1382–2118
№ 3	300–830	80–100	100	30–40	1150–858	70–80	7,5–10,0	230	1556–1845
Ag → Sn → Ag									
№ 4	530–670	183	100	10–25	1228	100	8,5–10,0	70	1313–1525
№ 5	700–1750	134	100	10–25	1616	100	8,5–10,0	90	1467–1636
№ 6	2030–2740	130–154	100	10–25	2383	100	8,5–10,0	120	1550–2383
S + Ag → Pb → S + Ag									
№1	60–90	80–90	100	до 10	1030	70–80	6,5	60	1400–2250
№2	80–100	90–130	100	до 10	1100	70–90	5,5	115	1400–2250
№3	210–300	80–110	100	20–40	1150–900	70–90	7,5	130	1500–1900
S + Ag → Sn → S + Ag									
№ 4	530–670	140	100	10–20	1250	100	6,5–7,5	60	1300–1500
№ 5	700–1750	150	100	10–30	1730	100	6,5–7,5	90	1457–1685
№ 6	2030–2740	130–150	100	10–30	2270	100	6,5–7,5	110	1650–2410

межах 10–40 і 10–30 мкм, а мікротвердість 900–1150 МПа і 1150–2270 МПа відповідно для КЕІП зі свинцем і циною.

Товщина зміцненого шару зі збільшенням енергії розряду зростає, і знаходиться в межах 60–130 і 60–110 мкм відповідно для КЕІП зі свинцем і циною. Мікротвердість зміцненого шару КЕІП

ТАБЛИЦЯ 3. Зведена таблиця параметрів якості КЕП зразків серій 1 і 2.

TABLE 3. Summary Table of quality parameters of CEC samples 1st and 2nd series.

Номер зразка	Матеріал електрода	Товщина покриття, мкм	Фото зразка з покриттям	Номер зразка	Матеріал електрода	Товщина покриття, мкм	Фото зразка з покриттям	Номер зразка	Матеріал електрода	Товщина покриття, мкм	Фото зразка з покриттям
Ag → Pb → Ag											
1	Ag	0,03		2	Ag	0,13		3	Ag	0,12	
	Pb	0,46			Pb	1,37			Pb	2,35	
	Ag	0,27			Ag	0,43			Ag	1,41	
S + Ag → Pb → S + Ag											
1*	S + Ag	0,03		2*	S + Ag	0,05		3*	S + Ag	0,11	
	Pb	0,27			Pb	0,66			Pb	1,76	
	S + Ag	0,19			S + Ag	0,26			S + Ag	1,01	
S + Ag → S + Pb → S + Ag											
1**	S + Ag	—		2**	S + Ag	0,05		3**	S + Ag	0,10	
	S + Pb	0,02			S + Pb	0,20			S + Pb	1,02	
	S + Ag	—			S + Ag	0,02			S + Ag	0,12	
Ag → Sn → Ag											
4	Ag	0,07		5	Ag	0,07		6	Ag	0,07	
	Sn	3,28			Sn	2,01			Sn	3,40	
	Ag	1,21			Ag	1,81			Ag	2,90	
S + Ag → Sn → S + Ag											
4*	S + Ag	0,11		5*	S + Ag	0,13		6*	S + Ag	0,12	
	Sn	1,07			Sn	1,43			Sn	1,92	
	S + Ag	0,69			S + Ag	1,05			S + Ag	1,31	
S + Ag → S + Sn → S + Ag											
4**	S + Ag	0,08		5**	S + Ag	0,20		6**	S + Ag	0,22	
	S + Sn	0,26			S + Sn	0,69			S + Sn	1,30	
	S + Ag	0,08			S + Ag	0,11			S + Ag	0,09	

* — зразки серії 2; ** — зразки серії 3.

для всіх зразків змінюється незначно і знаходиться в межах 1300–2410 МПа.

У разі нанесення покриттів на зразки серії 3 на всіх етапах формування КЕП відбувається руйнування шару аж до основи, напри-

клад, зразок 1** (табл. 3).

У таблиці 3 наведені результати вимірювання товщини шарів з м'яких антифрикційних металів срібла, свинцю і олова, які наносять на всіх стадіях формування КЕІП для всіх серій зразків.

Аналіз таблиці 3 показав, що у разі формування КЕІП на зразках БрО10С10 без сульфидування зі збільшенням режимів легування збільшується товщина сформованого покриття. Нанесення сірки (сульфидування) перед срібленням уповільнює приріст товщини КЕІП, а застосування сульфидування на всіх етапах формування практично повністю його руйнує.

У зразків серії 2 на оброблювану поверхню яких перед срібленням наносили сірчану мазь, зі збільшенням режимів легування товщина сформованого покриття збільшується з 0,19 до 1,3 мм. У зразків серії 3 на оброблювану поверхню яких сірчану мазь наносили перед кожним етапом легування, сірка сприяє руйнуванню КЕІП, а його остаточна товщина не перевищує 0,12 і 0,11 мм відповідно у разі ЕІЛ свинцем і циною.

Покриття зразків серії 3 руйнуються і їх не рекомендують до застосування.

4. ВИСНОВКИ

У результаті експериментальних досліджень встановлено наступне.

1. У разі формування КЕІП на зразках БрО10С10 без сульфидування зі збільшенням режимів легування збільшується товщина сформованого покриття з 0,27 до 2,9 мм, мікротвердість водночас знаходиться в межах 80–140 і 130–183 МПа відповідно для покриттів зі свинцем і циною, а шорсткість $Rz = 8,5\text{--}10,0$ мкм.

Суцільність КЕІП для всіх зразків становить 100%.

2. У зразків на оброблювану поверхню яких перед срібленням наносили сірчану мазь ($S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$), зі збільшенням режимів легування товщина сформованого покриття збільшується з 0,19 до 1,3 мм, мікротвердість знаходиться в залежності від місця вимірювання в межах 80–180 МПа, причому менше значення ближче до поверхні, а шорсткість $Rz = 5,5\text{--}7,5$ мкм. Суцільність для всіх зразків становить 100%.

3. У зразків серії 3 на оброблювану поверхню яких сірчану мазь наносили перед кожним етапом легування, сірка сприяє руйнуванню КЕІП, а його остаточна товщина не перевищує 0,12 і 0,11 мм відповідно у разі ЕІЛ свинцем і циною.

4. Для практичного застосування рекомендують КЕІП $S + Ag \rightarrow Pb \rightarrow S + Ag$ і $S + Ag \rightarrow Sn \rightarrow S + Ag$, у яких поверхня у разі тертя буде легше руйнуватися, а товщини достатньо для подальшого впливу будь-яким відомим способом (лезовою обробкою, безабразивною ультразвуковою фінішною обробкою та ін.).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. Н. Иванов, *Детали машин* (Москва: Высшая школа: 1991).
2. V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, and A. Dziuba, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 388 (2014).
3. U. Ozsarac, F. Findik, and M. Durman, *Mater. Design*, No. 28: 345 (2007).
4. J. P. Pathak and S. N. Tiwari, *Wear*, No. 155 (1): 37 (1992).
5. А. В. Кораблин, А. Ф. Сафиуллин, *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*, № 2: 111 (2013).
6. А. П. Перекрестов, В. А. Чанчиков, *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*, № 2: 147 (2013).
7. А. П. Перекрестов, А. А. Сычева, *Противоизносная присадка*: Патент РФ № 2276681 (Опубл. 20.05.2006).
8. В. И. Мощенок, Д. Б. Глушкова, Е. А. Нестеренко, *Вестник ХНАДУ*, № 38: 48 (2007).
9. J. E. Mahan, *Physical Vapour Deposition of Thin Films* (John Wiley & Sons: 2000).
10. А. Х. Валеева, И. Ш. Валеев, Р. Ф. Фазлыхметов, *Письма о материалах*, **4**, № 3: 134 (2014).
11. Т. В. Мосина, А. Д. Панасюк, А. И. Юга, *Порошковая металлургия*, № 9/10: 104 (1999).
12. K. Song, Y. Zhou, P. Zhao, Y. Zhang, and N. Bai, *Acta Metall. Sinica (English Letters)*, **26**, No. 2: 199 (2013).
13. S. Scudino, C. Unterdörfer, K. G. Prashanth, H. Attar, N. Ellendt, V. Uhlenwinkel, and J. Eckert, *Mater. Lett.*, **156**: 202 (2015).
14. Ming-Wen Chen, Wen-Long Zhang, Long-Fei Zuo, Bin Hou, and Zi-Dong Wang, *Proc. of the 13th IEEE International Conference on Nanotechnology Beijing (August 5–8, 2013)* (Beijing, China: 2013), p. 590.
15. Z. Wang, X. Wang, Q. Wang, I. Shih, and J. J. Xu, *Nanotechnology*, **20**, No. 7: 075605 (2009).
16. S. Aoyama and R. Urao, *J. Japan Institute of Metals*, **74**, No. 1: 49 (2010) (in Chinese).
17. И. В. Хомская, В. И. Зельдович, А. В. Макаров, А. Э. Хейфец, Н. Ю. Фролова, Е. В. Порохов, *Письма о материалах*, **3**: 150 (2013).
18. Saitoh Yasushi and Shibayama Takayuki, *Method of Producing Copper-Base Sintered Bearing Material*: Patent No. 6821477 US (Publ. 23.11.2004).
19. Saitou Yasushi, Inoue Eisaku, Fujita Masahito, and Shibayama Takayuki, *Copper-Based, Sintered Sliding Material and Method of Producing Same*, Patent 6767648 US (Publ. 27.07.2004).
20. Sakai Kenji, Inoue Eisaku, Kurimoto Satoru, Yamamoto Koichi, and Shibayama Takayuki, *Composite Sliding Material*, Patent No. 6602615 US (Publ. 05.08.2003).
21. X. Chen, Z. Wang, D. Ding, H. Tang, L. Qiu, X. Luo, and G. Shi, *Mater. Design*, **66**, Part A: 60 (2015).
22. L. Yu and C.-C. Jia, *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao/Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **23**, No. 8: 2169 (2013).
23. O. Yilmaz and H. Turhan, *Wear*, **249**, No. 10–11: 901 (2001).
24. G. Cui, Q. Bi, M. Niu, J. Yang, and W. Liu, *Tribology International*, **60**: 25 (2013).

25. S. Chen, D. An, Y. Bi, J. Liang, and C. Liu, *J. Composite Mater.*, **48**, No. 13: 1561 (2014).
26. B. Juszczak, J. Kulasa, S. Malara, M. Czepelak, W. Malec, B. Cwolek, and Ł. Wierzbicki, *Archives Metall. Mater.*, **59**, No. 2: 615 (2014).
27. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
28. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petrol. Eng.*, **53** (7–8): 540 (2017).
29. Д. Н. Коротаев, Е. В. Иванова, *Перспективные материалы*, № 2: 38 (2011).
30. С. А. Мезенцов, В. Н. Лясников, И. Ю. Гоц, *Вестник СГТУ*, № 4 (81): 107 (2015).
31. И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, С. С. Затуловский, *Сверхтвёрдые материалы*, № 6: 50 (2003).
32. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
33. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **54**: 147 (2018).
34. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and B. Antoshevskii, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **53**: 285 (2017).
35. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
36. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 266 (2017).
37. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).
38. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 1: 47 (2019).
39. B. Antoszewski and V. Tarelnik, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 301 (2014).
40. V. Tarelnyk and V. Martsynkovskyy, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 397 (2014).
41. *Детали машин* (Ред. Н. С. Ачеркан) (Москва: Издательство машиностроительной и судостроительной литературы: 1954), книга 2.
42. Т. В. Мосина, А. Д. Панасюк, А. И. Юга, О. Н. Григорьев, *Порошковая металлургия*, № 9/10: 104 (1999).
43. В. Б. Тарельник, Б. Антошевский, В. С. Марцинковский, П. Карп, А. В. Дзюба, *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, № 1: 39 (2015).
44. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, Ie. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS (Sep. 5–8, 2017, Sumy)*, vol. 233, p. 012048.
45. Б. А. Колачев, В. Н. Елагин, В. А. Ливанов, *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* (Москва: МИСиС: 2001).
46. В. С. Чиркин, *Теплофизические свойства материалов ядерной техники* (Москва: Атомиздат: 1967).

REFERENCES

1. M. N. Ivanov, *Detali Mashin* (Moscow: Vysshaya Shkola: 1991) (in Russian).
2. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, and A. Dziuba, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 388 (2014).
3. U. Ozsarac, F. Findik, and M. Durman, *Mater. Design*, No. 28: 345 (2007).
4. J. P. Pathak and S. N. Tiwari, *Wear*, **155**, Iss. 1: 37 (1992).
5. A. V. Korablin and A. F. Safiullin, *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 2: 111 (2013) (in Russian).
6. A. P. Perekrestov and V. A. Chanchikov, *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 2: 147 (2013) (in Russian).
7. A. P. Perekrestov and A. A. Sycheva, *Protivoiznosnaya Prisdka*: Patent RF No. 2276681 (Publ. 20.05.2006) (in Russian).
8. V. I. Moschenok, D. B. Glushkova, and E. A. Nesterenko, *Vestnik HNADU*, No. 38: 48 (2007) (in Russian).
9. J. E. Mahan, *Physical Vapour Deposition of Thin Films* (John Wiley & Sons: 2000).
10. A. Kh. Valeyeva, I. Sh. Valeyev, and R. F. Fazlyakhmetov, *Pis'ma o Materialakh*, **4**, No. 3: 134 (2014) (in Russian).
11. T. V. Mosina, A. D. Panasyuk, and A. I. Yuga, *Poroshkovaya Metallurgiya*, No. 9/10: 104 (1999) (in Russian).
12. K. Song, Y. Zhou, P. Zhao, Y. Zhang, and N. Bai, *Acta Metall. Sinica (English Letters)*, **26**, No. 2: 199 (2013).
13. S. Scudino, C. Unterdörfer, K. G. Prashanth, H. Attar, N. Ellendt, V. Uhlenwinkel, and J. Eckert, *Mater. Lett.*, **156**: 202 (2015).
14. Ming-Wen Chen, Wen-Long Zhang, Long-Fei Zuo, Bin Hou, and Zi-Dong Wang, *Proc. of the 13th IEEE International Conference on Nanotechnology Beijing (August 5–8, 2013)* (Beijing, China: 2013), p. 590.
15. Z. Wang, X. Wang, Q. Wang, I. Shih, and J. J. Xu, *Nanotechnology*, **20**, No. 7: 075605 (2009).
16. S. Aoyama and R. Urao, *J. Japan Institute of Metals*, **74**, No. 1: 49 (2010) (in Chinese).
17. I. V. Khomskaya, V. I. Zel'dovich, A. V. Makarov, A. E. Kheyfets, N. Yu. Frolova, and Ye. V. Shorokhov, *Pisma o Materialakh*, **3**: 150 (2013) (in Russian).
18. Saitoh Yasushi and Shibayama Takayuki, *Method of Producing Copper-Base Sintered Bearing Material*: Patent No. 6821477 US (Publ. 23.11.2004).
19. Saitou Yasushi, Inoue Eisaku, Fujita Masahito, and Shibayama Takayuki, *Copper-Based, Sintered Sliding Material and Method of Producing Same*, Patent 6767648 US (Publ. 27.07.2004).
20. Sakai Kenji, Inoue Eisaku, Kurimoto Satoru, Yamamoto Koichi, and Shibayama Takayuki, *Composite Sliding Material*, Patent No. 6602615 US (Publ. 05.08.2003).
21. X. Chen, Z. Wang, D. Ding, H. Tang, L. Qiu, X. Luo, and G. Shi, *Mater. Design*, **66**, Part A: 60 (2015).
22. L. Yu and C.-C. Jia, *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao/Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **23**, No. 8: 2169 (2013).
23. O. Yilmaz and H. Turhan, *Wear*, **249**, No. 10–11: 901 (2001).
24. G. Cui, Q. Bi, M. Niu, J. Yang, and W. Liu, *Tribology International*, **60**: 25

- (2013).
25. S. Chen, D. An, Y. Bi, J. Liang, and C. Liu, *J. Composite Mater.*, **48**, No. 13: 1561 (2014).
 26. B. Juszczak, J. Kulasa, S. Malara, M. Czepelak, W. Malec, B. Cwolek, and Ł. Wierzbicki, *Archives Metall. Mater.*, **59**, No. 2: 615 (2014).
 27. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
 28. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**, Iss. 7–8: 540 (2017).
 29. D. N. Korotayev and Ye. V. Ivanova, *Perspektivnyye Materialy*, No. 2: 38 (2011) (in Russian).
 30. S. A. Mezentsov, V. N. Lyasnikov, and I. Yu. Gots, *Vestnik SGTU*, No. 4 (81): 107 (2015) (in Russian).
 31. I. A. Podchernyayeva, A. D. Panasyuk, and S. S. Zatulovskiy, *Sverkhhtvyordye Materialy*, No. 6: 50 (2003) (in Russian).
 32. V. B. Tarelnik, O. P. Gaponova, E. V. Konoplyantschenko, N. S. Yevtushenko, and V. A. Gerasimenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
 33. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **54**: 147 (2018).
 34. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and B. Antoshevskii, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **53**: 285 (2017).
 35. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
 36. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 266 (2017).
 37. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).
 38. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, and Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47 (2019).
 39. B. Antoszewski and V. Tarelnik, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 301 (2014).
 40. V. Tarelnyk and V. Martsynkovskyy, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 397 (2014).
 41. *Detali Mashin* (Ed. N. S. Acherkan) (Moscow: Izdatel'stvo Mashinostroitel'noy i Sudostroitel'noy Literatury: 1954), book 2 (in Russian).
 42. T. V. Mosina, A. D. Panasyuk, A. I. Yuga, and O. N. Grigor'yev, *Poroshkovaya Metallurgiya*, No. 9/10: 104 (1999) (in Russian).
 43. V. B. Tarel'nik, B. Antoshevskiy, V. S. Martsinkovskiy, P. Karp, and A. V. Dzyuba, *Kompressornoe i Energeticheskoe Mashinostroenie*, No. 1: 39 (2015) (in Russian).
 44. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, Ie. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *15th Int. Sci. Eng. Conf. Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS (Sep. 5–8, 2017, Sumy)*, vol. 233, p. 012048.
 45. B. A. Kolachev, V. N. Yelagin, and V. A. Livanov, *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Tsvetnykh Metallov i Splavov*

1138 О. П. ГАПОНОВА, В. Б. ТАРЕЛЬНИК, В. С. МАРЦИНКОВСКИЙ та ін.

(Moscow: MISiS: 2001) (in Russian).

46. V. S. Chirkin, *Teplofizicheskie Svoystva Materialov Yadernoy Tekhniki* (Moscow: Atomizdat: 1967) (in Russian).