

PACS numbers: 46.32.+x, 46.35.+z, 46.50.+a, 46.55.+d, 61.72.Qq, 61.82.Bg

Розробка системи спрямованого вибору найбільш ефективної технології підвищення якості бабітових покриттів підшипників ковзання. Ч. 1. Особливості технологій нанесення бабітових покриттів

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*, Є. В. Коноплянченко,
Н. В. Тарельник, М. Ю. Думанчук, М. О. Мікуліна, В. О. Пирогов,
С. О. Горовий, Н. К. Медведчук**

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

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

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

В статті обґрунтовано важливість і актуальність проблеми підвищення робочих характеристик і ресурсу роботи бабітових підшипників ковзання (ПК), які є опорами роторів великої кількості відцентрових насосів, компресорів, турбін та іншого динамічного обладнання, що працює при висо-

Corresponding author: Vyacheslav Borysovyeh Tarel'nyk
E-mail: tarel'nyk@i.ua

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

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

***Khmelnyskyi National University,
11 Instytut'ska Str., UA-29016 Khmelnytskyi, Ukraine*

Citation: V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, N. V. Tarel'nyk, M. Y. Dumanchuk, M. O. Mikulina, V. O. Pirogov, S. O. Gorovoy, and N. K. Medvedchuk, Development the Directed Choice System of the Most Efficient Technology for Improving the Sliding Bearings Babbitt Covers Quality. Pt. 1. Peculiarities of Babbitt Coating Technologies, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 11: 1475–1493 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.11.1475](https://doi.org/10.15407/mfint.44.11.1475)

ких режимних параметрах (швидкостях, навантаженнях і температурах), а також в умовах корозійного, абразивного та інших видів впливу робочих середовищ. Аналіза технології створення та умов роботи бабітових ПК показала, що причиною пониження їх довговічності є чинники, що формуються як на стадії виготовлення, так і при експлуатації. Вихід із ладу ПК при нормальних умовах експлуатації є наслідком різних видів зношування: кавітації, абразивного зносу, пошкодження внаслідок пластичних деформацій, усталеного пошкодження та ін. Стійкість до зносу антифрикційного шару залежить від режиму роботи та конструкції підшипника, фізичних властивостей з'єднання шару з основою, жорсткості валу та постелі під підшипниками. Встановлено, що якість антифрикційного шару підшипника необхідно оцінювати за такими критеріями: міцністю зчеплення покриття з основою, когезійною міцністю антифрикційного шару, пористістю, однорідністю структури. Встановлено, що при виготовленні ПК, формування методом електроіскрового легування (ЕІЛ) проміжного шару з міді, міцно зчепленого, з одного боку, із крицевою підкладкою, а з іншого — з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) і бабіту, забезпечує більш міцне (на 35%) зчеплення в порівнянні з традиційною технологією (криця 20 + бабіт), крицевої підкладки з бабітом, а також інтенсивніше відведення тепла із зони тертя. Визначено, що резервом підвищення якості формування бабітових покриттів, що значною мірою впливає на довговічність ПК, може бути нова технологія, в якій всі операції здійснюються методом ЕІЛ. Означено, що для визначення більш раціональної технології нанесення бабітових покриттів необхідно розробити фізично обґрунтований математичний модель, що пов'язує знос певної кількості бабіту з витраченою на це роботою тертя.

Ключові слова: підшипник ковзання, бабіт, покриття, знос, структура, перехідний шар, міцність зчеплення, електроіскрове легування, математичний модель.

The article substantiates the importance and relevance of increasing problem of the performance and service life of babbitt sliding bearings (SB), which are the rotors supports of a large number of centrifugal pumps, compressors, turbines and other dynamic equipment operating at high operating parameters (speeds, loads and temperatures), as well as in conditions of corrosive, abrasive and other types of working environment's influence. The analysis of the babbitt SBs production technology and operating conditions showed that the reason for the decrease in their durability are factors that are formed both at the stage of manufacture and during operation. SB failure under normal operating conditions is a consequence of wear various types: cavitation, abrasive wear, damage due to plastic deformations, fatigue damage, *etc.* The antifriction layer wear resistance depends on the mode of operation and design of the bearing, the physical properties of the connection between the layer and the base, the rigidity of the shaft and the bed under the bearings. As established, the bearing anti-friction layer quality must be evaluated according to the following criteria: adhesion strength of the coating to the base, cohesive strength of the anti-friction layer, porosity, and homogeneity of the structure. As established, during the production of SBs, the formation by the method of electrospark alloying (ESA) of a copper intermediate layer, firmly

bonded with steel substrate, and tin layer (formation of solid substitution solutions) and babbitt provides a stronger (by 35%) of adhesion, compared to traditional technology (steel 20 + babbitt), steel substrate with babbitt, as well as more intensive removal of heat from the friction zone. As determined, a new technology in which all operations are carried out by the ESA method can be a reserve for improving the babbitt coatings formation quality, which significantly affects the durability of the SB. As determined, in order to determine a more rational technology for applying babbitt coatings, it is necessary to develop a physically based mathematical model that relates the wear of a certain amount of babbitt to the frictional work spent on it.

Key words: sliding bearing, babbitt, coating, wear, structure, transition layer, adhesion strength, electrospark alloying, mathematical model.

(Отримано 8 серпня 2022 р.; остаточн. варіант — 12 вересня 2022 р.)

1. ВСТУП

Більшість відповідальних деталей та вузлів динамічного обладнання працюють при високих режимних параметрах (швидкостях, навантаженнях і температурах), а також в умовах корозійного, абразивного та інших видів впливу робочих середовищ. Вирішення проблеми, пов'язаної зі збільшенням термінів служби машин та механізмів, безпосередньо залежить від підвищення зносостійкості та надійності вузлів тертя.

При великому розмаїтті умов роботи деталей найбільш навантаженим у них є поверхневий шар з якого, як правило, і починається їх руйнування. Тому реальний ресурс роботи обладнання залежить від несучої здатності поверхонь деталей, яка визначається якістю їх поверхневого шару, від якої і залежить стійкість до зношування.

З кожним роком як в Україні, так і в країнах ближнього та далекого зарубіжжя, вчені займаються створенням нових ефективних технологій підвищення якості поверхневого шару деталю. Серед великого різноманіття цих технологій немалий відсоток займають технологічні процеси формування поверхневого шару з наперед визначеними властивостями, які відрізняються від основного матеріалу, тобто створіння композиційних матеріалів типу «основа-покриття», що поєднують захисні властивості покриттів із механічною міцністю основи. Таким чином, створення поверхневих шарів з особливими властивостями для вузлів тертя ковзання, в даному випадку підшипників ковзання (ПК), є актуальним завданням.

2. АНАЛІЗА ОСНОВНИХ ДОСЯГНЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В сучасному машинобудуванні дуже багато пар тертя вузлів динамічного обладнання підлягають зношуванню переважно в перехід-

них (пуск, зупинка) технологічних режимах. Це вузли опорних, упорних та опорно-упорних ПК [1–4], масляних ущільнень [5–7], торцевих імпульсних ущільнень [8–12], сполучних муфт [13–15].

Зростання швидкості, використання гнучких роторів, консольні та аеродинамічні навантаження, автоколивання та інші фактори ускладнили завдання регулювання характеристик системи «ротор–підшипник». Щоб мінімізувати нестійкість і схильність до вібрацій цієї системи, розробляються різні конструкції ПК. У цьому проблемі підвищення якості ПК вирішуються як технологічними [16, 17], так й конструктивними способами [5, 18].

Вихід із ладу ПК при нормальних умовах експлуатації є наслідком різних видів зношування: кавітації, абразивного зносу, пошкодження внаслідок пластичних деформацій, усталеного пошкодження та ін. Стійкість до зносу антифрикційного шару залежить від режиму роботи та конструкції підшипника, фізичних властивостей з'єднання шару з основою, жорсткості валу та постелі під підшипниками.

Надійність ПК значною мірою залежить від якості їх виготовлення, а також проведення монтажних і ремонтних робіт, виконання усіх вимог конструкторської й технологічної документації.

Якість поверхневого шару ПК залежить від матеріалу покриття, методи його нанесення, додержання технологічного процесу та ін. Найбільш широко при виготовленні вкладишів підшипників (ВП) використовують антифрикційні стопи на олов'яній і свинцевій основі (бабіти). Бабіти складаються з м'яких металів Sn, Pb, Cd, Sb, Zn і характеризуються наявністю твердих структурних складових у пластичній матриці. Залежно від конструкції ПК бабіт наносять як на криволінійні (рис. 1, а, б), так і на пласкі поверхні (рис. 1, в).

Основні вимоги до антифрикційних стопів визначаються умовами роботи ПК. Ці стопи повинні мати достатню жорсткість, але не дуже високу, щоб не викликати сильного зносу валу; порівняно легко деформуватися під впливом місцевих напруг; утримувати мастильний матеріал на поверхні; мати малий коефіцієнт тертя між валом та підшипником. Крім того, значною мірою на працездатність ПК впливає якість зчеплення антифрикційного бабітового шару з підкладкою.

Істотним недоліком бабітів є те, що з підвищенням температури понижуються всі показники механічної міцності, особливо опір втоми.

Зазначені явища мають місце у разі порушення нормальної роботи ПК через перевищення несучої здатності (допустимого навантаження на підшипник) збідненого мастила; недостатнього охолодження олії; неякісної олії; попадання в мастило абразивних включень; підвищеної механічної вібрації валу.

Однією із суттєвих причин виходу ПК з ладу є неякісна заливка

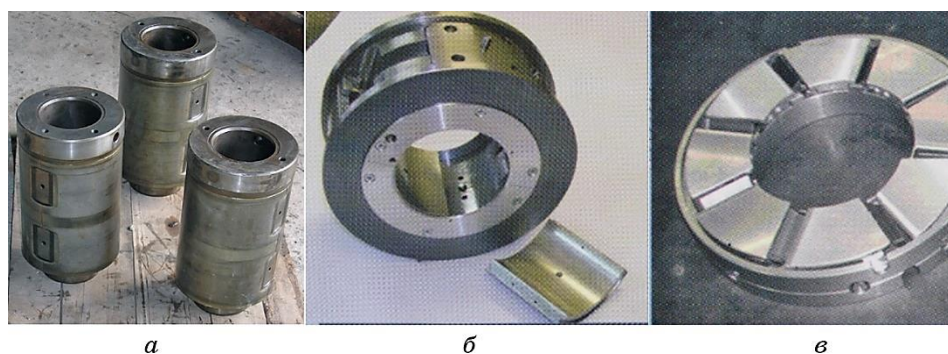


Рис. 1. Конструктивні елементи ПК із бабітовим покриттям: *a* — зовнішня поверхня опорних пальців зубчастих коліс; *б* — внутрішня поверхня вкладишів опорних ПК; *в* — пласка поверхня упорного ПК.

Fig. 1. Structural elements of SB with babbitt coatings: *a*—the gear wheels supporting fingers outer surface; *б*—the support SBs liners inner surface; *в*—the thrust SB flat surface.

бабіту (погане приставання бабіту до поверхні вкладиша, пористість та ін.) і, як наслідок, неможливість формування масляного клину (рис. 2, *a*).

Якість прилягання бабіту до корпусу вкладиша, як правило, перевіряють методом кольорової дефектоскопії (рис. 2, *б*). Існують і інші методи: перевірка ультразвуком, візуальний огляд, шляхом обстукування легким молотком, зануренням на 1,5–2,0 години у ванну з гасом, з наступним протиранням насухо і видавлюванням гасу або бульбашок повітря пальцями, та ін.

Зі сказаного вище можна визначити, що причиною пониження довговічності ПК є чинники, що формуються як на стадії виготовлення, так і при експлуатації.

Більшість способів формування поверхонь бабітових ПК слід розглядати як альтернативні. Один і той самий матеріал покриття може бути нанесений декількома способами (рис. 3). При цьому можуть відрізнятися як властивості покриття, так і витрати на його нанесення.

Зазвичай бабіти заливають на підігріті вкладиші (250°C) за температури 450–480°C. Найчастіше застосовують відцентрове заливання. Заливають також у кокіль під тиском, товщина заливки в підшипниках 1–3 мм.

Як правило, перед заливкою бабітів поверхня крицевого вкладиша піддається лудженню. Перехідний шар, що зумовлює міцний металевий зв'язок, при цьому відсутній, що негативно впливає на якість заливки бабіту, теплопровідність та працездатність підшипника загалом.



Рис. 2. Неякісна заливка бабітового шару ПК (а) і перевірка якості адгезії антифрикційного шару методом кольорової дефектоскопії (б) [19].

Fig. 2. Low-quality filling of the SB babbitt layer (a) and checking the adhesion quality of the anti-friction layer by the colour defectoscopy method (b) [19].

Необхідно відзначити, що зі зменшенням товщини антифрикційного бабітового шару збільшуються його механічні властивості. Найменша товщина заливки допускається 0,25–0,4 мм.

Останніми роками для виготовлення та ремонту ПК набули поширення декілька нових метод: газотермічне напорошення, гальванічне нарощування, штампування в температурному інтервалі кристалізації, надзвукове напорошення ДИМЕТ [20–24].

Аналіза літературних джерел засвідчила, що сучасна технологія має дуже велику кількість метод формування антифрикційних бабітових шарів ПК, кожен з яких має як переваги, так і недоліки, а також свою технологічну нішу. Таким чином, проблему підвищення якості ПК можна вирішити шляхом аналізу проблем і видів існуючих метод формування його поверхневого антифрикційного шару та вибором більш перспективного.

Нижче наведена аналіза переваг та недоліків більш поширених метод нанесення антифрикційних покриттів на елементи ПК.

Відцентрове лиття [20]. При відцентровому литті розтопленій бабіт вводять в середину обертового вкладиша, для цього використовують спеціальний верстат або пристосування, яке встановлюють на токарному верстаті. Враховуючи те, що кожен стоп бабіту має свої властивості, лиття повинне проходити із суворим додержанням режимів топлення й заливання, що потребує якісного контролю на всіх етапах технологічного процесу.

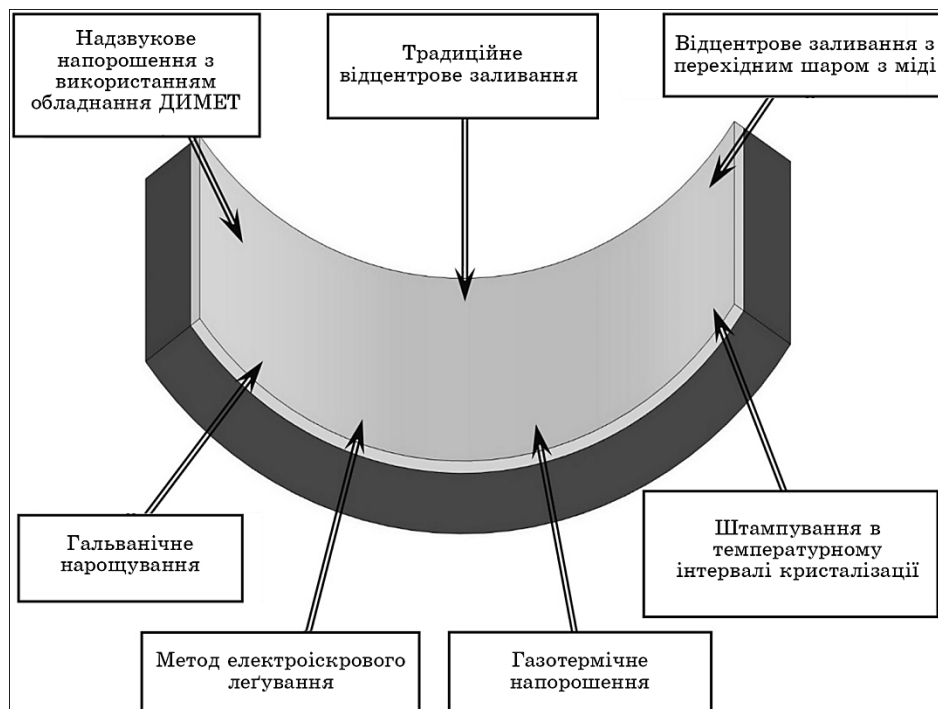


Рис. 3. Деякі способи нанесення бабітового шару на крицеву підкладинку вкладишів опорного ПК.

Fig. 3. Some methods of babbitt layer coating on the supporting SB liners steel substrate.

Газотермічне (газополум'яне) напорошення [21] — це процес нанесення на основу розтоплених частин металу з високою швидкістю. Цим способом можна виготовляти та відновлювати деталі машин, зокрема й ПК. Метод забезпечує високу продуктивність, дає змогу одержувати покриття в широкому діапазоні товщини (0,1–3 мм) і спектра властивостей з урахуванням умов експлуатації.

Недоліками газополум'яних покриттів є невисока міцність зчеплення напорошеного матеріялу з матеріялом основи, пористість покриття, зміна структури напорошеного матеріялу.

Гальванічне нарощування [22]. Спосіб виготовлення та відновлення зношених ВП шляхом гальванічного формування багатокомпонентних покриттів. Технологія гальванічного нарощування передбачає попереднє механічне оброблення вкладишів, їх знежирення, щавлення, осадження тонкого нікелевого покриття на алюмінієву основу внутрішньої поверхні деталю й осадження антифрикційних стопів Pb–Sn–Sb або Pb–Sn–Cu з борфтористоводневих електролітів. Уведення у свинцево-олов'яні стопи третього компонента під-

вищує їх мікротвердість, поліпшує припрацьовуваність, зносостійкість і стійкість проти ерозії.

Крім екологічних проблем, до недоліків пов'язаних із гальванічним нарощуванням, можна також віднести зростання внутрішніх напружень, що виникають у поверхневому шарі в міру збільшення товщини антифрикційного покриття. Розтягувальні внутрішні напруження приводять до зменшення втомної міцності. Ще одним істотним недоліком є невисока адгезія напорошених покриттів з основою.

Штамування в температурному інтервалі кристалізації [23]. Це відносно новий спосіб формування антифрикційного шару ПК. Він включає застосування штампування в температурному інтервалі кристалізації бабіту. Спосіб дає змогу максимально ефективно керувати процесом структуроутворення в стопі бабіту за рахунок кращих умов кристалізації, можливості впливати на структуру в широкому інтервалі температуро-швидкісних умов, що дає змогу формувати оптимальну, з погляду експлуатаційних властивостей, макро- і мікроструктуру по всій поверхні, а також по всьому об'єму антифрикційного шару. Недоліком способу є довготривалий і складний технологічний цикл.

У [24] ТОВ «Обнінський центр порошкового напилення» пропонує нову технологію нанесення металевих покриттів при надзвукових зіткненнях з поверхнею частинок, прискорених повітрям, яка одержала назву ДИМЕТ. Таку саму назву має і обладнання, за допомогою якого такі покриття можна наносити.

Як правило, у всіх випадках основою для напорошення є криця 20 (ГОСТ 1050-88). Хоча можуть використовуватися інші матеріали, що мають хорошу адгезію з оловом, такі, як криця 10, криця 15, бронза, латунь. Під час заливання вкладишів з основою поверхні з чавуну, на яку наноситься бабітовий шар, нікелюються [25].

В [26] якість покриття характеризується такими властивостями: міцністю зчеплення покриття з основою, когезійною міцністю напорошеного шару, пористістю, рівномірною товщиною покриття, рівнем залишкових напруг, однорідністю структури та властивостей покриття.

У [27] стверджується, що міцність зчеплення покриттів з матеріалом деталю залежить від багатьох чинників та умов виконання технологічного процесу. Визначальний вплив на зчеплення мають хемічний склад матеріалу деталю, його термічне оброблення, механічні умови електрохімічних операцій, початкові та наступні режими електроосадження.

Розробку та впровадження ефективних технологій формування покриттів зумовлено, з одного боку, необхідністю економії дорогих леґувальних елементів матеріалу, що наносять, а з іншого — вже наявними умовами експлуатації деталей.

Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання технологій, що застосовують концентровані потоки енергії (КПЕ): плазмове напорошення [28, 29] і плазмове оброблення [30, 31], лазерне оброблення [32, 33]. У нерівноважних умовах нагрівання і охолодження при обробленні КПЕ відбувається формування принципово інших, ніж при традиційних методах термічного і механічного впливу, структур поверхневого шару.

До числа сучасних метод поверхневого оброблення металевих поверхонь КПЕ відноситься електроіскрове легування (ЕІЛ), що дає змогу одержати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними і трибологічними властивостями на нанорівні [34].

У порівнянні з традиційними технологіями нанесення покриттів метода ЕІЛ має переваги: локальність, високий ступінь адгезії, виникнення невеликого теплового фону і, як наслідок, відсутність поводок і деформацій, простий і гнучкий технологічний процес, екологічна безпека та ін. [35]. Не зважаючи на незаперечні переваги, метода ЕІЛ має і недоліки: відносно мала і нерівномірна товщина формованого шару, його пористість, шерсткість та ін. [36, 37].

Властивості поверхневих шарів, одержаних контактним і безконтактним способом ЕІЛ, в різних середовищах, на різних основах, з використанням електрод, виготовлених з різних струмопровідних матеріалів, описані в [38, 39].

При зближенні електрод поверхні піддаються локальній дії високих тисків ударних хвиль і температури [40]. При цьому відбувається миттєвий розігрів аноди, і капля або тверда частинка його матеріалу переміщується на катоду. Летючі від аноди до катода фрагменти нагріваються до високої температури. Максимально короткочасний нагрів поверхневих мікрооб'ємів досягає $(5-7) \cdot 10^3$ °C. Іскровий розряд відбувається в мікроскопічно малих об'ємах і триває 50–400 мікросекунд. На катоді утворюються лунки і мікротріщини, в яких частинки аноди і катода взаємодіють між собою і навколишнім середовищем, активізуються дифузійні процеси, що приводить до утворення нових фаз і зміни структур в поверхневому шарі.

В попередніх роботах [17] нами було запропоновано на крицеву підкладку перед лудінням оловом наносити проміжний шар із міді. Формування методом ЕІЛ проміжного шару з міді, міцно зчепленого, з одного боку, із крицевою підкладкою, а з іншого — з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) і бабіту, забезпечує більш міцне зчеплення крицевої підкладки з бабітом, а також інтенсивніше відведення тепла із зони тертя.

Слід відмітити, що проміжний шар із міді можна було нанести і іншою метою, наприклад, гальванічним нарощуванням, яким можна наносити як одношарові [41, 42], так і багатошарові покриття [43], але при цьому відсутній перехідний шар, який забезпечує міцний зв'язок між міддю та підкладкою.

На рисунку 4, *a* показані мікроструктура і розподіл мікротвердості в граничній зоні між крицею 20 і оловом, нанесеним з використанням традиційної технології — лудінням. Перехідний шар між оловом і підкладкою (крицею 20) відсутній. Мікротвердість різко змінюється за величиною від 310–340 (олово) до 1750–1800 МПа (криця 20). Воднораз олово утримується на крицевій підкладці лише за допомогою адгезії.

При ЕІЛ криці 20 міддю між оловом і міддю в дифузійній зоні утворюються тверді розчини заміщення, що забезпечують міцніший зв'язок. Мікротвердість у перехідній зоні спочатку плавно підвищується від 210–230 (олово) до 2700–2800 МПа (ЗТВ), а потім поступово знижується до мікротвердості основи (рис. 4, *б, в*).

На рисунку 5, *a* зображено найбільш характерну ділянку поверхневого шару криці 20 після ЕІЛ міддю і оловом у площині, перпендикулярній покриттю. Сформований поверхневий шар складаєть-

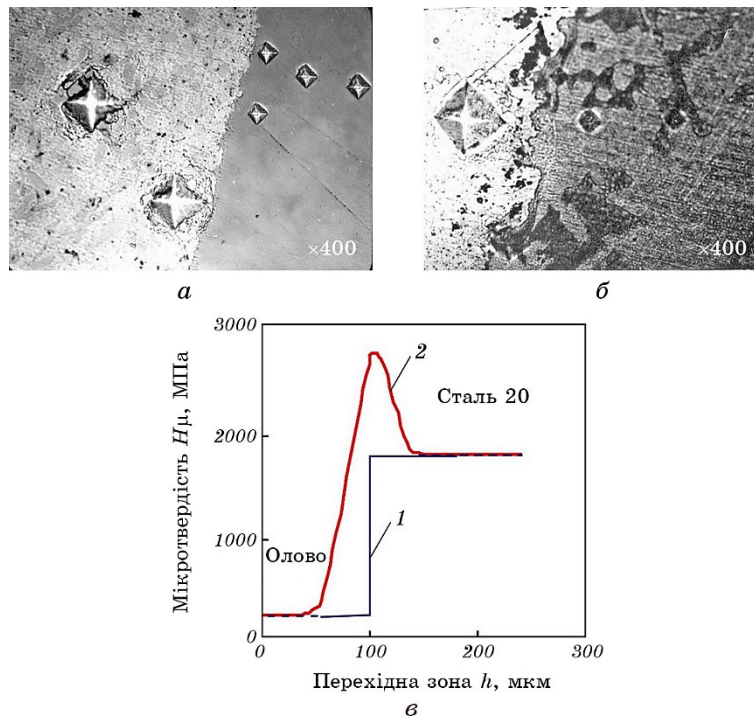


Рис. 4. Мікроструктура після лудіння оловом криці 20 (*a*) та з підшаром з міді (ЕІЛ) (*б*); розподіл мікротвердості (*в*): 1 — криця–олово; 2 — криця–мідь (ЕІЛ).

Fig. 4. Microstructure after tinning of steel 20 (*a*) and with a copper sublayer (ESA) (*б*); distribution of microhardness (*в*): 1—steel–tin; 2—steel–copper (ESA).

ся із двох зон. На поверхні розташовується шар олова товщиною 10–15 мкм. Нижче є шар, що складається переважно з міді завтовшки 15–20 мкм. Як у першому, так і в другому шарах є замкнуті пори розміром від часток до 3 мкм, причому пори більшого розміру знаходяться у шарі міді. Дослідження складу покриття по глибині свідчить про те, що граничні ділянки між оловом, міддю і крицею 20 складаються з елементів сусідніх шарів, що вказує на їх дифузійний перерозподіл у покритті. У міру поглиблення у нижніх шарах олова зростає концентрація міді. На межі між міддю та крицею концентрація міді знижується, а заліза — зростає. У разі ЕІЛ криці міддю і наступного лудіння оловом (рис. 5, б) істотних відмінностей у структурі сформованого поверхневого шару не спостерігається. Дослідження розподілу елементів у покритті вказує на відсутність перехідного шару між міддю та оловом. У перехідній зоні від покриття із міді до залізної основи концентрація міді знижується. На тій ділянці плавно зростає концентрація заліза. Це свідчить про інтенсивне перемішування та взаємну дифузю елементів підкладинки та покриття.

Порівняльними дослідженнями міцності зчеплення антифрикційного шару з бабіту (Б83 та Б88) з підкладинкою із криці 20, які проводилися при випробуваннях на стиск за ГОСТ ИСО 4386-2-99 методом відриву антифрикційного бабітового шару від підкладинки, встановлено, що застосування перехідних шарів із міді, що наносяться методом ЕІЛ у захисному середовищі (аргон), підвищує міцність зчеплення крицевої підкладинки з антифрикційним шаром бабіту в порівнянні з традиційною технологією (криця 20 + бабіт) на 35%.

Крім цього, нами був запропонований новий спосіб нанесення антифрикційного бабітового покриття на крицеві вкладиші ПК [44], який включає нанесення на поверхню вкладишів електроерозійного покриття з м'якого матеріалу (міді, олов'яної бронзи, або олова) методом ЕІЛ. Спосіб здійснюють спочатку з енергією розряду $W_p = 0,1-0,5$ Дж, а потім з $W_p = 0,01-0,05$ Дж. На одержане покриття наносять електроерозійне покриття з олов'яно-сурм'яного бабіту, після чого виконують ЕІЛ графітовою електродою спочатку з $W_p = 0,2-0,4$ Дж, а потім з $W_p = 0,05-0,15$ Дж. В результаті на поверхні вкладишів ПК одержують антифрикційне бабітове покриття, що забезпечує підвищення якості вкладишів, їх несучу та навантажувальну здатність, а також надійність та довговічність.

У спеціалізованій дослідницькій лабораторії ВАТ «Гродно Азот» проводили дослідження якості зразків із криці 20 з бабітовими покриттями, сформованими різними методами [45]. Результати переваг і недоліків досліджених антифрикційних бабітових покриттів, представлені в табл. 1.

Таким чином, в результаті проведених літературних досліджень

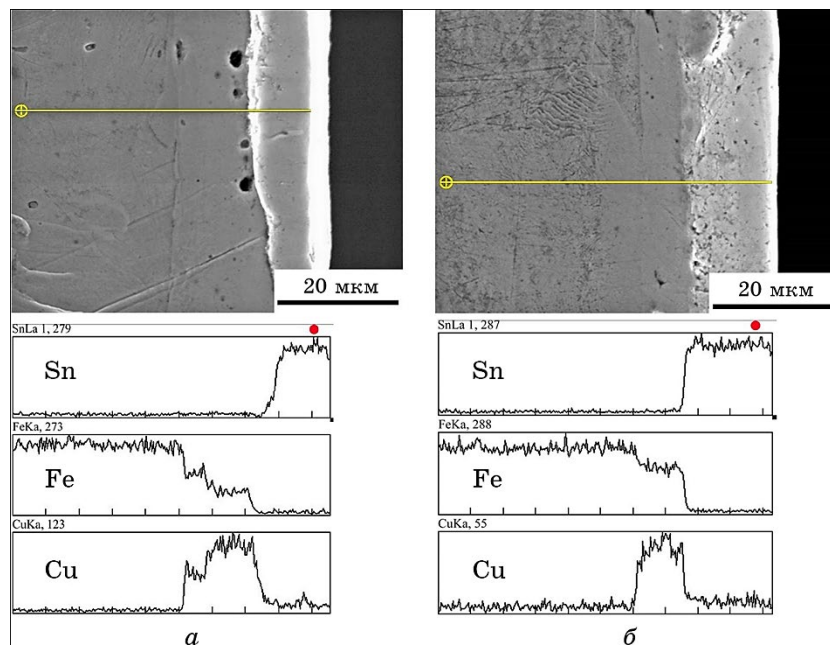


Рис. 5. Вид поперечного перерізу покриттів на криці 20: ЕІЛ послідовно міддю і оловом (а) і ЕІЛ міддю і наступним лудінням оловом (б) і розподіл Sn, Fe і Cu по глибині покриттів, $\times 2000$.

Fig. 5. Cross-section view of coatings on steel 20: EIL successively with copper and tin (a) and EIL with copper and subsequent tinning with tin (b) and the distribution of Sn, Fe and Cu along the depth of the coatings, $\times 2000$.

встановлено, що бабітові покриття ПК підлягають різним видам зношування: кавітації, абразивного зносу, пошкодженню внаслідок пластичних деформацій та ін. Враховуючи, що способів нанесення на крицеву підкладку антифрикційних бабітових покриттів існує велика кількість і кожен з них має як переваги так й недоліки, важко без проведення порівняльних іспитів віддати перевагу одному з них. Стійкість бабітових покриттів проти зношування в значній мірі залежить від способу їх нанесення. При цьому досить перспективними можуть бути антифрикційні бабітові покриття, сформовані з застосуванням перехідних шарів з міді, які наносяться методом ЕІЛ і значно підвищують міцність з'єднання крицевої підкладки з антифрикційним бабітовим шаром.

Метою роботи є встановлення кореляційної залежності між роботою тертя, затраченою при зношуванні бабітових покриттів, нанесених за різними технологіями, та зносом і на цій підставі розроблення фізично обґрунтованого математичного моделю, що дасть змогу визначати як пряму задачу — знос за відомою роботою тертя, так і зво-

ТАБЛИЦЯ 1. Характеристика якості бабітових покриттів вкладишів ПК, сформованих різними методами.**TABLE 1.** Characterization of the SB liners babbitt coatings quality which formed by different methods.

№	Метода нанесення бабіту	Недоліки	Переваги
1	Надзвукове напорошення з використанням обладнання ДИМЕТ	Хемічна та спектральна аналізи бабіту не відповідають за хемічним складом бабіту Б83 ГОСТ 1320-74. Підвищений вміст свинцю 1,28%. Понижена твердість бабіту — 18,1 НВ. Збіднення (відсутність) кубоподібних кристалів β -фази, розмір сторін складових дуже дрібний — не більше 0,005 мм	Після кольорової дефектоскопії дефектів не виявлено
2	Традиційне відцентрове заливання		Хемічна та спектральна аналізи бабіту відповідають за хемічним складом бабіту Б83 ГОСТ 1320-74. Рівномірний розподіл кубоподібних кристалів β -фази з розмірами сторін 0,07 мм
3	Відцентрове заливання з перехідним шаром з міді	Після кольорової дефектоскопії виявлено поширені пори без переважної орієнтації*	Хемічна та спектральна аналізи бабіту відповідає за хемічним складом бабіту Б83 ГОСТ 1320-74. Рівномірний розподіл кубоподібних кристалів β -фази з розмірами сторін 0,07 мм
4	Традиційне наливне заливання	Відносно великі розміри (0,14–0,3 мм) кубоподібних кристалів — β -фази	Хемічна та спектральна аналізи бабіту відповідають за хемічним складом бабіту Б83 ГОСТ 1320-74
5	Наливне заливання з перехідним шаром з міді	Відносно великі розміри (0,14–0,3 мм) кубоподібних кристалів — β -фази	Хемічна та спектральна аналізи бабіту відповідають за хемічним складом бабіту Б83 ГОСТ 1320-74
6	Метода ЕІЛ	Після кольорової дефектоскопії виявлено поширені пори без переважної орієнтації*	Хемічна та спектральна аналізи бабіту відповідають за хемічним складом бабіту Б83 ГОСТ 1320-74

* — пори, виявлені кольоровою дефектоскопією на торці зразків №№ 3 і 6, утворюються в результаті ЕІЛ крицевої підкладки та присутні лише на зовнішній поверхні заготовки.

ротню — роботу тертя, необхідну для досягнення певної кількості зносу.

3. ВИСНОВКИ

1. Обґрунтована важливість і актуальність проблеми підвищення робочих характеристик і ресурсу роботи бабітових підшипників ковзання (ПК).
2. Аналіза технології створення та умов роботи бабітових ПК показала, що причиною пониження їх довговічності є чинники, що формуються як на стадії виготовлення, так і при експлуатації.
3. Встановлено, що якість антифрикційного шару підшипника необхідно оцінювати за такими критеріями: міцністю зчеплення покриття з основою, когезійною міцністю антифрикційного шару, пористістю, однорідністю структури.
4. Визначено, що при виготовленні ПК, формування методом ЕІЛ проміжного шару з міді, міцно зчепленого з одного боку з крицевою підкладкою, а з іншого — з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) і бабіту, забезпечує більш міцне (на 35%) зчеплення в порівнянні з традиційною технологією (криця 20 + бабіт) крицевої підкладки з бабітом, а також інтенсивніше відведення тепла із зони тертя.
5. Резервом підвищення якості формування бабітових покриттів, що значною мірою впливає на довговічність ПК, може бути нова технологія, в якій всі операції здійснюються методом ЕІЛ.
6. Для визначення більш раціональної технології нанесення бабітових покриттів необхідно розробити фізично обґрунтований математичний модель, що пов'язує знос певної кількості бабіту з витраченою на це роботою тертя.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
2. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
3. I. Pavlenko, V. Simonovskiy, V. Ivanov, J. Zajac, and J. Pitel (Eds. V. Ivanov et al.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Springer, Cham.: 2019), p. 325.
4. E. A. Petrovsky, K. A. Bashmur, Yu. N. Shadchina, V. V. Bukhtoyarov, and V. S. Tynchenko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1399**: 055032 (2019).
5. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 328 (2015).
6. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 402 (2015).
7. V. Yurko and V. Martsynkovskyy, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 356 (2014).
8. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
9. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*,

- 53: 266 (2017).
10. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).
 11. A. Zahorulko, *Eastern European J. Enterprise Technol.*, **4**, Iss. 7: 45 (2015).
 12. S. Blasiak and A. Zahorulko, *Tribology International*, **94**: 126 (2016).
 13. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Springer: 2020), p. 216.
 14. John Crane, *Power Transmission Couplings. TLK Membrane Coupling for High Power Applications in the Process Industry*.
 15. J. Yao, L. Chen, F. Liu, C. Yin, et al., *International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration (Chuangchun, People's Republic of China, July 16–19, 2012)* (Beijing: China Machine Press: 2012), paper A003, p. 16.
 16. A. S. Kalinichenko, U. L. Basiniuk, and E. I. Mardasevich, *Sci. Technique*, **18**, Iss. 3: 195 (2019).
 17. 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).
 18. I. F. Santos, *Mech. Ind.*, **12**: 275 (2011).
 19. В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Плякин, *Сборник докладов участников семинара «ЭККОН-11» X111 Международной научно-технической конференции «ГЕРВИКОН-2011»* (Сумы: 2011), с. 197.
 20. И. Г. Галиахметов, *Конструкционные материалы центробежных и винтовых компрессоров. Выбор и технология их применения* (Казань: Изд-во «ФОН»: 2009).
 21. С. К. Пометун, *Химическая техника*, № 4: 8 (2009).
 22. А. П. Лебедева, Т. Н. Погорелова, *Восстановление деталей машин* (Москва: Машиностроение: 2003).
 23. Н. П. Барыкин, Р. Ф. Фазлыахметов, *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 9: 27 (2006).
 24. ДИМЕТ — новая технология нанесения металлических покрытий (ООО «Обнинский центр порошкового напыления»), *Химическая техника*, № 5: 29 (2010).
 25. А. В. Сегаль, *Технология производства центробежных и винтовых компрессоров и холодильных машин* (Казань: Изд-во «ФОН»: 2009).
 26. С. О. Лузан, *Механика та машинобудування*, № 2: 211 (2011).
 27. Е. Д. Плешка, *Электронная обработка материалов*, № 2: 17 (2008).
 28. V. I. Kuz'min, A. A. Mikhal'chenko, O. B. Kovalev, E. V. Kartayev and N. A. Rudenskaya, *J. Therm. Spray Tech.*, **21**: 159 (2012).
 29. A. D. Pogrebnyak, V. I. Ivashchenko, P. L. Skryn'skyu, O. V. Bondar, P. Konarski, K. Zaleski, S. Jurga, and E. Coy, *Composites Part B-Engineering*, **142**: 85 (2018).
 30. G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatoulian, L. Houssiau, and D. Mantovani, *Surface and Interface Analysis*, **53**, Iss. 7: 658 (2021).
 31. G. Maistro, S. Kante, L. Nyborg, and Y. Cao, *Surfaces and Interfaces*, **24**: 101093 (2021).
 32. B. Antoszewski, S. Tofil, M. Scendo, and W. Tarelnik, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012036 (2017).
 33. I. Pliszka and N. Radek, *Procedia Engineering*, **192**: 707 (2017).
 34. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко,

- В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
35. V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, O. P. Gaponova, Ie. V. Konoplianchenko, M. Ya. Dovzyk, N. V. Tarelnyk, and S. A. Gorovoy, *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. 012049.
 36. 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.
 37. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
 38. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, M. Goncharenko, B. Antoszewski, and O. Gaponova, *2018 IEEE 8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP) (Sept. 9–14, 2018)*, p. 1.
 39. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Antoszewski, Cz. Kundera, V. Martsynkovskyy, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, and O. Vasilenko, *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019). Springer Proceedings in Physics* (Singapore: Springer: 2020), vol. 240, p. 195.
 40. Д. Н. Коротаев, *Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием* (Омск: СибАДИ: 2009).
 41. L. Ropyak and V. Ostapovych, *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, **2**, No. 5: 50 (2016).
 42. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskyy, *Energies*, **15**, No. 1: 83 (2022).
 43. L. Ya. Ropyak, M. V. Makoviichuk, I. P. Shatskyi, I. M. Pritula, L. O. Gryn, and V. O. Belyakovskyy, *Func. Mater.*, **27**, No. 3: 638 (2020).
 44. В. С. Марцинковский, В. Б. Тарельник, А. В. Дзюба, *Способ обработки вкладышей подшипников скольжения*: Патент 2598737 РФ на изобретение, МПК В23Н 9/00 (2006.01), заявл. 21.11.2016; опубл. 27.09.2016. Бюл. № 27 (2016).
 45. В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, вип. 94: 102 (2010).

REFERENCES

1. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
2. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
3. I. Pavlenko, V. Simonovskiy, V. Ivanov, J. Zajac, and J. Pitel (Eds. V. Ivanov et al.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Springer, Cham.: 2019), p. 325.
4. E. A. Petrovsky, K. A. Bashmur, Yu. N. Shadchina, V. V. Bukhtoyarov, and

- V. S. Tynchenko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1399**: 055032 (2019).
5. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 328 (2015).
 6. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and V. I. Yurko, *Chem. Petrol. Eng.*, **51**: 402 (2015).
 7. V. Yurko and V. Martsynkovskyy, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 356 (2014).
 8. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
 9. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 266 (2017).
 10. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).
 11. A. Zahorulko, *Eastern European J. Enterprise Technol.*, **4**, Iss. 7: 45 (2015).
 12. S. Blasiak and A. Zahorulko, *Tribology International*, **94**: 126 (2016).
 13. V. Martsynkovskyy, V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Springer: 2020), p. 216.
 14. John Crane, *Power Transmission Couplings. TLK Membrane Coupling for High Power Applications in the Process Industry*.
 15. J. Yao, L. Chen, F. Liu, C. Yin, et al., *International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration (Chuangchun, People's Republic of China, July 16–19, 2012)* (Beijing: China Machine Press: 2012), paper A003, p. 16.
 16. A. S. Kalinichenko, U. L. Basiniuk, and E. I. Mardasevich, *Sci. Technique*, **18**, Iss. 3: 195 (2019).
 17. 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).
 18. I. F. Santos, *Mech. Ind.*, **12**: 275 (2011).
 19. V. B. Tarel'nik, V. S. Marcinkovskij, and A. V. Pljakin, *Sbornik Dokladov Uchastnikov Seminara 'JeKKON-11' H111 Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii 'HERVIKON-2011'* (Sumy: 2011), p. 197 (in Russian).
 20. I. G. Galiahmetov, *Konstrukcionnye Materialy Tsentrobezhnykh i Vintovykh Kompresorov. Vychor i Tehnologiya Ikh Primeneniya* [Structural Materials of Centrifugal and Screw Compressors. The Choice and Technology of Their Application] (Kazan': Izd-vo 'FON': 2009) (in Russian).
 21. S. K. Pometun, *Khimicheskaya Tekhnika*, No. 4: 8 (2009) (in Russian).
 22. A. P. Lebedeva and T. N. Pogorelova, *Vosstanovlenie Detaley Mashin* [Restoration of Machine Parts] (Moscow: Mashinostroenie: 2003) (in Russian).
 23. N. P. Barykin and R. F. Fazlyahmetov, *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. Obrabotka Materialov Davleniem*, **9**: 27 (2006) (in Russian).
 24. DIMET—Novaja Tehnologiya Naneseniya Metallicheskih Pokrytiy (OOO 'Obninskiy Centr Poroshkovogo Napyleniya) [DIMET—a New Technology for Applying Metal Coatings (LLC Obninsk Center for Powder Spraying)], *Khimicheskaya Tekhnika*, **5**: 29 (2010) (in Russian).
 25. A. V. Segal', *Tekhnologiya Proizvodstva Centrobezhnykh i Vintovykh Kompresorov i Holodil'nykh Mashin* [Production Technology of Centrifugal and Screw Compressors and Refrigeration Machines] (Kazan': Izd-vo 'FON':

- 2009) (in Russian).
26. S. O. Luzan, *Mekhanika ta Mashynobuduvannya*, **2**: 211 (2011) (in Russian).
 27. E. D. Pleshka, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **2**: 17 (2008) (in Russian).
 28. V. I. Kuz'min, A. A. Mikhal'chenko, O. B. Kovalev, E. V. Kartaev and N. A. Rudenskaya, *J. Therm. Spray Tech.*, **21**: 159 (2012).
 29. A. D. Pogrebnjak, V. I. Ivashchenko, P. L. Skrynskyy, O. V. Bondar, P. Konarski, K. Zaleski, S. Jurga, and E. Coy, *Composites Part B-Engineering*, **142**: 85 (2018).
 30. G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatoulian, L. Houssiau, and D. Mantovani, *Surface and Interface Analysis*, **53**, Iss.7: 658 (2021).
 31. G. Maistro, S. Kante, L. Nyborg, and Y. Cao, *Surfaces and Interfaces*, **24**: 101093 (2021).
 32. B. Antoszewski, S. Tofil, M. Scendo, and W. Tarelnik, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012036 (2017).
 33. I. Pliszka and N. Radek, *Procedia Engineering*, **192**: 707 (2017).
 34. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
 35. V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, O. P. Gaponova, Ie. V. Konoplianchenko, M. Ya. Dovzyk, N. V. Tarelnyk, and S. A. Gorovoy, *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. 012049.
 36. 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.
 37. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
 38. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, M. Goncharenko, B. Antoszewski, and O. Gaponova, *2018 IEEE 8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP) (Sept. 9–14, 2018)*, p. 1.
 39. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Antoszewski, Cz. Kundera, V. Martsynkovskyy, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, and O. Vasilenko, *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019). Springer Proceedings in Physics* (Singapore: Springer: 2020), vol. 240, p. 195.
 40. D. N. Korotaev, *Tekhnologicheskie Vozmozhnosti Formirovaniya Iznosostoikikh Nanostruktur Elektroiskrovym Legirovaniem* [Technological Possibilities of Wear-Resistant Nanostructure Formation by Electric-Spark Alloying] (Omsk: SibADI: 2009) (in Russian).
 41. L. Ropyak and V. Ostapovych, *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, **2**, No. 5: 50 (2016).
 42. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskyy, *Energies*, **15**, No. 1: 83 (2022).

43. L. Ya. Ropyak, M. V. Makoviichuk, I. P. Shatskyi, I. M. Pritula, L. O. Gryn, and V. O. Belyakovskiy, *Func. Mater.*, **27**, No. 3: 638 (2020).
44. V. S. Marcinkovskij, V. B. Tarel'nik, and A. V. Dzjuba, *Sposob Obrabotki Vkladyshhey Podshipnikov Skol'zheniya* [Processing Method for Plain Bearing Shells]: Patent 2598737 RF, МПК В23N 9/00 (2006. 01) (Bulletin 27) (2016) (in Russian).
45. V. B. Tarel'nik, V. S. Marcinkovskij, and A. V. Belous, *Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Silskoho Hospodarstva Imeni Petra Vasylenka*, **94**: 102 (2010) (in Russian).