
II. Результати наукових досліджень

УДК 620.197

О. Ю. Повстяной, Н. Ю. Імбірович

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА ДЕТАЛЯХ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті досліджується процес нанесення комбінованого захисного покриття на ступки, виготовлені з відходів промислового виробництва. Описано сам процес нанесення покриття, що включає в себе електродугову металізацію з подальшим синтезом. Вивчено мікроструктури та експлуатаційні характеристики захисних покриттів ступок.

Ключові слова: захисне покриття, відходи промислового виробництва, металізація, оксидокерамічне покриття, зносостійкість.

Вступ

Методи та технологічні процеси порошкової металургії дозволяють широко використовувати відходи виробництва: стружку; металобрухт; обрізки, які після розплаву розпиляються в порошок із заданими фізико-хімічними і технологічними властивостями. Отримані порошки можна використовувати для виготовлення композиційних матеріалів триботехнічного та конструкційного призначення. Утилізація шліфувальних відходів підшипникового виробництва дозволяє отримувати порошки високолегованої підшипникової сталі ШХ15. У Луцькому національному технічному університеті (ЛНТУ) протягом багатьох років проводяться теоретичні та експериментальні дослідження з поліпшення фізико-механічних та технологічних характеристик порошків сталі ШХ15, отриманих унаслідок утилізації шліфувальних шлаків.

Деталі конструкційного призначення в різноманітних вузлах і механізмах піддаються зношуванню. З метою вирішення цієї проблеми актуальним є нанесення комбінованого захисного покриття, яке суттєво підвищить зносостійкість деталей в умовах реверсивного тертя. На сьогодні також розглядаються питання, пов'язані з процесом взаємодії поверхонь, що контактують в процесі взаємного переміщення. При цьому створення і підбір триботехнічних матеріалів базуються на вирішенні взаємопов'язаних задач (на основі вивчення механіки тертя і фізико-хімічних явищ, які проходять на відповідних поверхнях) [1, 2]. Контакт взаємодії твердих тіл спостерігається лише в окремих зонах, розміри і густина розміщення яких залежать від величини прикладеного навантаження, а також від напружено-деформованого стану контактів. Ці контакти залежать від геометричної форми мікронерівностей і механічних властивостей поверхневого шару.

© Повстяной Олександр Юрійович, докторант Луцького національного технічного університету (ЛНТУ), моб. тел. (050) 661-13-33; Імбірович Наталія Юріївна, доцент ЛНТУ; e-mail: povstjanoj@mail.ru; 43000, Волинська обл., м. Луцьк, вул. Львівська, 75

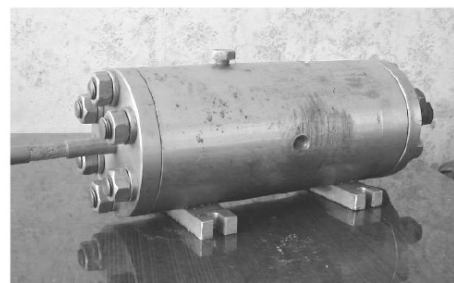
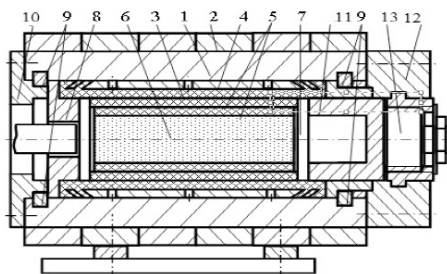
Нанесення електрометалізаційного покриття із подальшим оксидуванням надасть можливість захистити деталі від спрацювання та підвищити їхню довговічність практично до нескінченності. При цьому оксидокерамічні покриття характеризуються дуже високою мікротвердістю, причому при впровадженні такої технології захисту деталей від зношування у найбільш відповідальних вузлах і механізмах машин можна значно подовжити термін напрацювання обладнання до стану, до якого можна уникати ремонту чи відмови. Цей метод захисту, поряд зі зносостійкістю, суттєво підвищує корозійну стійкість деталей, що функціонують в умовах агресивних середовищ.

Виходячи з цього, метою роботи є дослідження процесів нанесення комбінованого захисного покриття для підвищення зносостійкості деталей конструкційного призначення, отриманих із відходів промислового виробництва.

Матеріали і методи дослідження

В якості початкового матеріалу використовували шліфувальний шлам сталі ШХ15, що утворюється після механічної обробки кілець та роликів підшипників в умовах ПАТ «SKF-Україна» (згаданий шліфувальний шлам містить значну кількість оксидів заліза та хрому, продуктів абразивного зносу шліфувальних кругів, а також різних масел, штучних рідин і води). Для отримання високоякісного порошку ШХ15 було застосовано нову запатентовану технологію, де головною відмінністю від існуючих переробок шламових відходів промислового виробництва є те, що після подрібнення утвореного спеку проводять додаткове подрібнення-обкочування на кульовому млині з метою надання частинкам порошку менших розмірів та регулярної кулеподібної форми [3, 4]. Отриманий за цією технологією металевий порошок – це високоякісний порошок із частинками регулярної форми та розмірів і високими технологічними властивостями.

Процес пресування здійснювали на установці (рис. 1), яка забезпечує рівномірний розподіл густини в пресовках. Використання радіальної схеми пресування дозволило отримувати деталі з рівномірним розподілом густини у широкому діапазоні тисків [5].



а

б

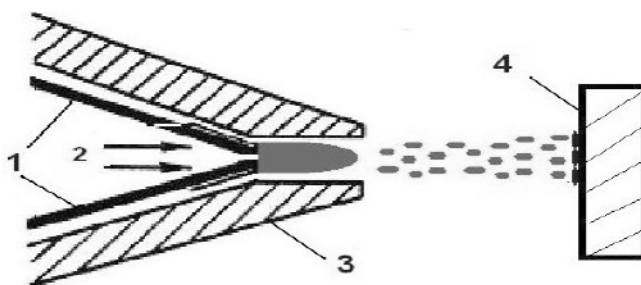
- 1 – корпус; 2 – кільця (бандаж); 3 – еластичний вкладиш; 4 – армуючий елемент;
5 – набір еластичних оболонок; 6 – порошок; 7 – пробка; 8 – упорний диск;
9 – кулачки розрізні; 10, 12 – кришки; 11 – стакан; 13 – повзун

Рис. 1. Схема конструкції (а) та загальний вигляд (б) прес-блоку напівпромислової установки для пресування в замкнутому об'ємі

Спінання сформованих заготовок є однією з важливих технологічних операцій, які застосовуються при виготовленні деталей методами порошкової металургії. Спінання проводили за допомогою самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-спінання) [6].

Електрометалізаційне (або, як його ще називають, електродугове) напилення є одним зі способів нанесення металевих покриттів на металеві й неметалеві поверхні. Електродугове напилення застосовують давно, й в основному для одержання цинкових та алюмінієвих антикорозійних покриттів, а також нанесення зносостійких і відновних покриттів.

Захисне покриття отримували шляхом розпилення суцільного дроту за допомогою електродугового металізатора з модифікованою розпилювальною системою (рис. 2), де електрична дуга горить у каналі розпилювальної головки (що дозволяє одержувати дрібнодисперсні покриття) [7].



1 – дроти; 2 – повітряний струмінь; 3 – корпус розпилювальної головки; 4 - підклад

Рис. 2. Процес електродугового напилення

Для живлення металізатора постійним струмом використовували випрямляч зварювальний типу «ВДУ-505».

Для очищення стисненого повітря від твердих частин, води і мінерального мастила застосовували фільтр-вогловідділювач «23-25-4-4ХЛ4».

Процес нанесення покриття на зразок включав у себе такі операції: знежирення зразка; дробоструменеву обробку; напилення зразків; контроль якості напилення; шліфування зразків.

Разом з тим, для нанесення корозійностійкого захисного покриття на деталях конструкційного призначення широко використовують метод плазмоелектролітного оксидування (ПЕО), який є одним із найсучасніших і перспективних методів отримання на поверхні металів і сплавів захисних шарів, що володіють комплексом важливих характеристик: зокрема, властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО. Так, для здійснення спрямованого синтезу поверхневих шарів заданого складу на металах і сплавах у режимі плазмового електролітичного оксидування при виборі складу електроліту і режимів оксидування необхідно керуватися низкою тез, і в т.ч. враховувати можливість зміни форм перебування аніонних комплексів у розчині залежно від величини рН (як в об'ємі електроліту, так і в локальній області приелектродного простору) [8].

Розробку оксидокерамічного покриття здійснювали у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України шляхом створення на деталях комбінованого покриття зі сплаву Д16 (за допомогою електрометалізації з подальшим оксидуванням). Для забезпечення ПЕО

деталь-втулку закріплювали у пристосуванні і захищали не покриті сплавом Д16 поверхні від контакту з електролітом, оскільки оксидування заліза неприпустиме (адже для утворення оксидокерамічного покриття придатні лише вентильні метали) і призведе до погіршення перебігу процесу утворення оксидокерамічного покриття.

При цьому основними електрофізичними параметрами процесу є анодна напруга U_a , катодна напруга U_k , густини катодного і анодного струмів I_k та I_a , тривалість імпульсів і їх частота та тривалість процесу (τ , у хв) [9].

Загальний вигляд установки для плазмоелектролітного оксидування див. на рис. 3.



Рис. 3. Загальний вигляд установки для ПЕО

Для нанесення оксидокерамічного покриття (ОКП) задаються режими, до яких відносять густину струму на аноді та катоді й анодну і катодну напруги. Спочатку визначається площа поверхні, що підлягає оксидуванню, і, залежно від необхідної товщини покриття, встановлюється час проходження відповідного процесу. Так, у нашому випадку ОКП наносили на деталі з різними товщиною і режимами проходження процесу ПЕО за співвідношень густини струмів $I_k/I_a = 1$ та $I_k/I_a = 1,5$.

Процес ПЕО проходив в електроліті такого складу: 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла, а решта вода. Густина струму приймали як $i = 20$ А/дм² для трьох зразків та $i = 7,5$ А/дм² для одного зразка.

Результати дослідження та їх обговорення

Автори цього дослідження проводили експерименти на чотирьох зразках-втулках, виготовлених із відходів промислового виробництва (порошок сталі ШХ15). Для цього попередньо було зроблено і протравлено мікрошліфи. Травлення зразків проводили за допомогою травника (0,5...3 %-спиртовим розчином плавикової кислоти HF). Для ілюстрації наведемо загальний вигляд зразка № 1 після нанесення на нього комбінованого покриття (рис. 4). Зразки №№ 2 і 3 мають аналогічний зовнішній вигляд, проте нанесені на них покриття мають різні товщини і режими ПЕО, тому наводимо лише одну фотографію.

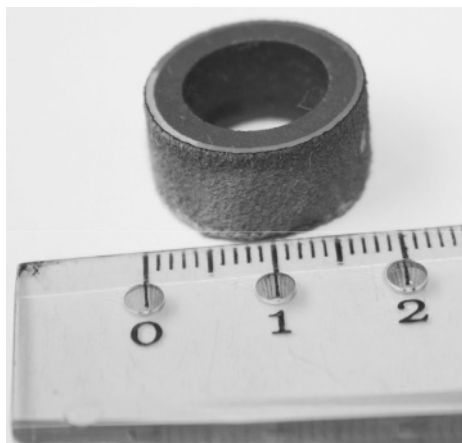


Рис. 4. Загальний вигляд втулок після нанесення комбінованого покриття

При дослідженні мікроструктури зразків, спресованих і спечених із порошку сталі ШХ15, виявлено досить значну кількість графітових і мідних включень та фериту (рис. 5).

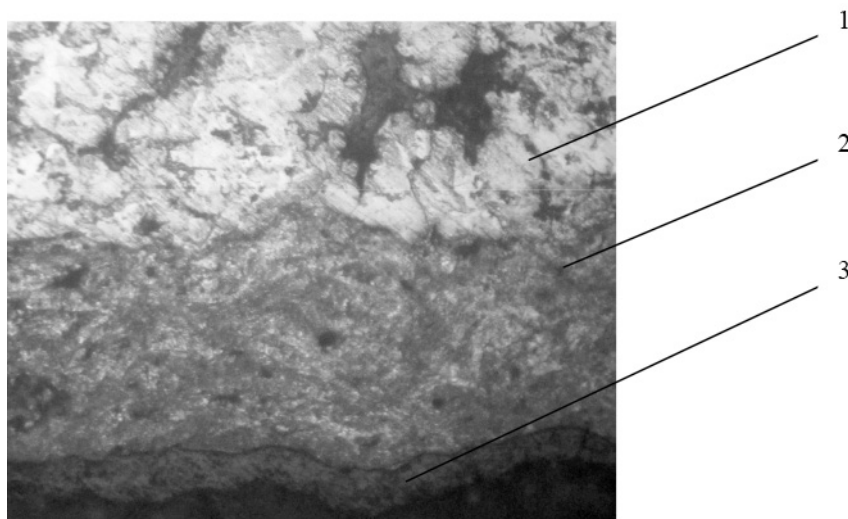


Рис. 5. Мікроструктура зразків-втулок ($\times 100$)

На рис. 5 у верхній межі бачимо основний метал (позиція 1), а нижче темно-сірим кольором зображено електрометалізаційне покриття (позиція 2) та плазмоелектролітнооксидоване покриття (позиція 3). Межа між основним металом і електродуговим покриттям є чітко вираженою, проте не дуже рівномірною. Для того, щоб побачити і порівняти, як змінюється мікроструктура зразка до і після травлення, наводимо дослідження мікроструктури зразка до травлення (рис. 6).

На рис. 6 бачимо нетравлену область зразка. Якщо порівнювати мікроструктуру нетравленої області електродугового покриття і травленої області, то спостерігаємо не лише різницю у забарвленні (на рис. 6 електродугове покриття має світле забарвлення, а на рис. 5 темніше), але й, також, у протравленій області бачимо структуру і зерна покриття.

Мікроструктури травлених областей при збільшеннях $\times 250$ та $\times 400$ представлено на рис. 7.

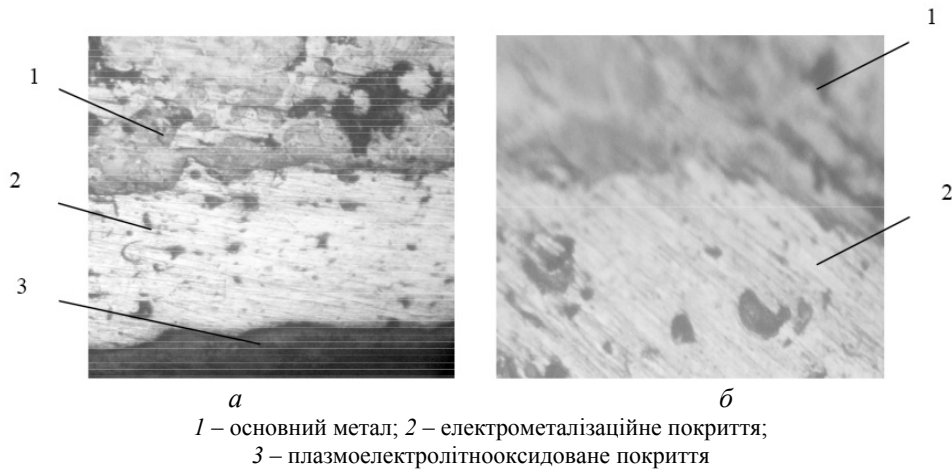


Рис. 6. Мікроструктура нетравлених областей зразка при збільшенні: $\times 100$ (а); $\times 250$ (б)



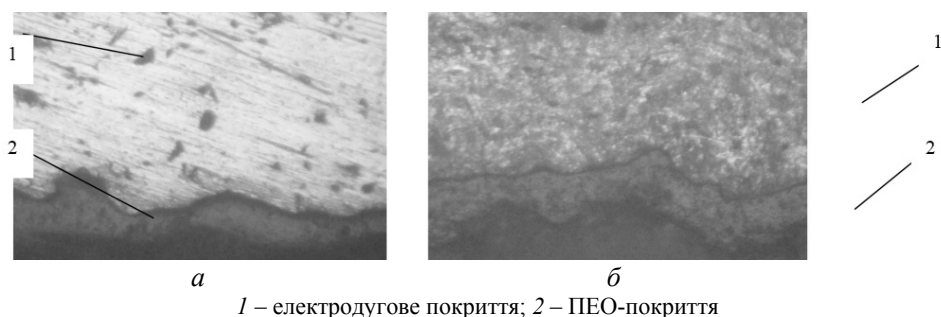
Рис. 7. Мікроструктура травленої області зразка: $\times 250$ (а); $\times 400$ (б)

З рис. 7 видно, що область між основним металом і покриттям є невеликою, з чого можна зробити висновок, що електродугове покриття має досить високу адгезію до основного металу. Тож, проаналізувавши рис. 5 та 6, встановили, що графітові включення спостерігаються у структурі основного металу і розташовані хаотично.

Мікроструктура плазмоелектролітнооксидованих покриттів характеризується однорідною структурою та своєрідною пористістю. Разом з тим, після травлення спостерігається чіткіша межа розподілу як електрометалізаційного покриття, так і того, яке утворене в результаті плазмоелектролітного оксидування (що характерно для всіх зразків).

На рис. 8, а представлено нетравлену область зразка, а на рис. 8, б – травлену, причому можна відзначити, що ПЕО-покриття характеризуються значною кількістю нерівностей шару (а саме западинами і виступами).

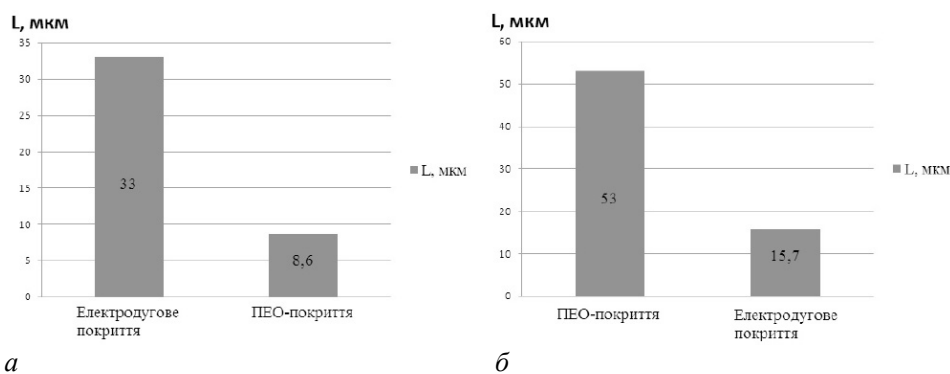
Після травлення бачимо чітку межу розподілу електрометалізаційного та оксидокерамічного покриттів, причому зерна на оксидокерамічному покритті не виділяються.



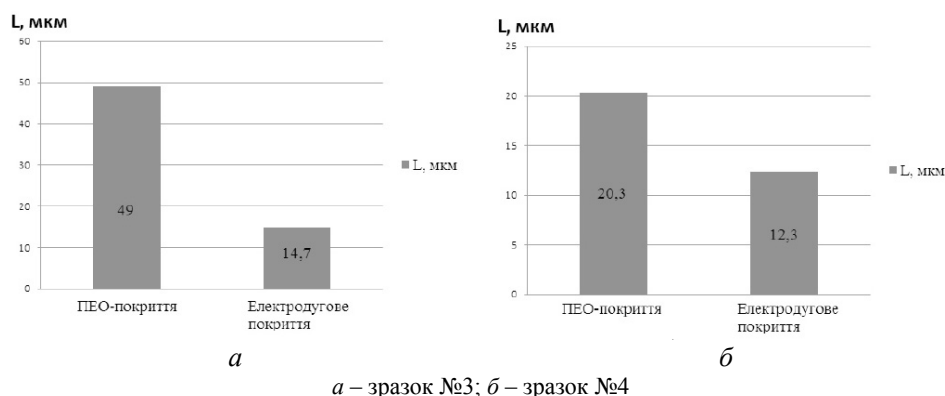
1 – електродугове покриття; 2 – ПЕО-покриття
 Рис. 8. Мікроструктура зразка-втулки: $\times 100$, нетравлена область (а); $\times 100$, травлена область (б)

Комбіноване захисне покриття утворене напиленням електрометалізаційним шаром і плазмоелектролітним оксидокерамічним шаром. Товщину кожного з покриттів визначали шляхом промірів у трьох місцях і визначенням середнього значення товщини для кожного з покриттів. Шляхом додавання середньої товщини електродугового та ПЕО-покриттів визначено середню товщину комбінованого захисного покриття.

Графічні залежності товщини покриття від методу нанесення для чотирьох зразків-втулок представлені на рис. 9 та 10.



а – зразок №1; б – зразок №2
 Рис. 9. Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення



а – зразок №3; б – зразок №4
 Рис. 10. Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення

Для визначення мікротвердості було використано мікротвердомір «ПМТ-3». Визначали мікротвердість основного металу й електродугового та

плазмоелектролітнооксидованого покриттів шляхом нанесення по три уколи у кожній області (два уколи робили по краях, а ще один посередині покриття чи основного металу). Після уколів залишалися відбитки від індентора (алмазної піраміди). Вимірювали діагональ відбитка та підставляли в формулу. Таким чином визначали мікротвердість кожного зі зразків.

Формула для визначення мікротвердості має такий вигляд:

$$H_{\mu} = \frac{1,854 \cdot P(\text{кґ})}{(N_{\mu} \cdot 0,0003)^2} = \left[\frac{\text{кґ}}{\text{мм}^2} \right] \quad (1)$$

де: P – вага вантажу, кґ;

N_{μ} – число поділок лімба.

Наводимо також узагальнені графіки зміни мікротвердості (починаючи з основного металу й охоплюючи покриття): числові дані середніх значень мікротвердості на основному металі й електрометалізаційному та ПЕО-покриттях наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Середнє значення мікротвердості зразків

Зразок	Покриття		
	Основний метал	Електродугове покриття	ПЕО-покриття
№1	592,8	327	3876,5
№2	653,3	295,6	8305
№3	736,3	613,6	4616
№4	991,6	1526,6	7157

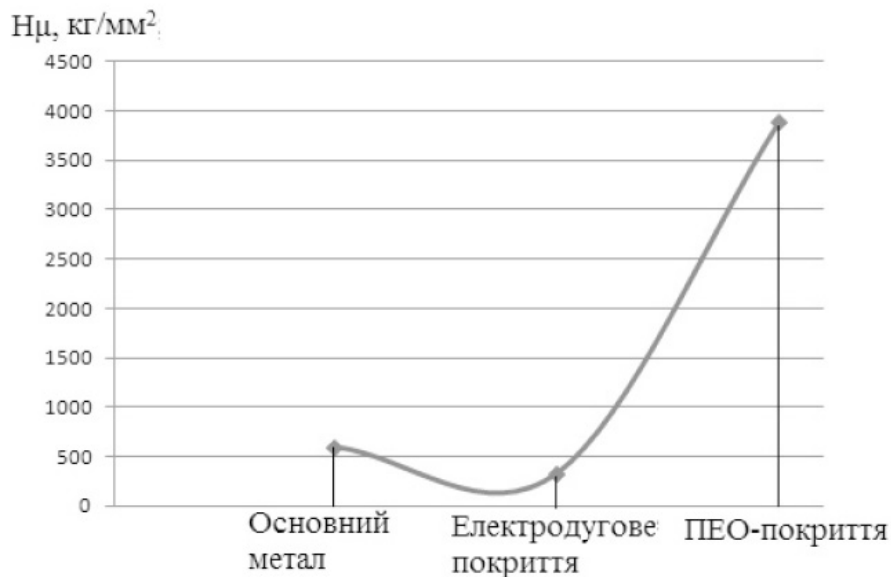


Рис. 11. Узагальнена залежність зміни мікротвердості від методу нанесення покриття для втулок, виготовлених із відходів промислового виробництва

На рис. 11 бачимо зміну мікротвердості залежно від методу нанесення покриття. Мікротвердість спочатку спадає на електродуговому покритті, а після цього починає дуже стрімко зростати, переходячи на ПЕО-покриття.

Висновки

На основі аналізу літератури та попередніх досліджень показано, що методи порошкової металургії дають можливість створення композиційних антифрикційних матеріалів із відходів промислового виробництва – з різноманітними включеннями різних структурних складових, що входять у матеріал (це, зокрема, порошок сталі ШХ15).

Перспективним напрямом при цьому є розробка композитів на базі порошоків конструкційних сталей, отриманих із відходів промислового виробництва.

Так, авторами було нанесено комбіноване захисне покриття на деталі конструкційного призначення – втулки, що функціонують в умовах реверсивно-поступального тертя. Зокрема, нанесено на втулки захисне покриття (за допомогою електродугової металізації та плазмоелектролітного оксидування).

У процесі експериментальних досліджень було встановлено такі основні характеристики покриттів: найбільша товщина комбінованого захисного покриття втулок дорівнює 63,7 мкм; найбільша мікротвердість електродугового покриття втулок $H_{\mu} = 1526,6 \text{ кг/мм}^2$; найвища мікротвердість плазмоелектролітнооксидованого покриття втулок $H_{\mu} = 1526,6 \text{ кг/мм}^2$.

В статье исследуется процесс нанесения комбинированного защитного покрытия на втулки, изготовленные из отходов промышленного производства. Описан сам процесс нанесения покрытия, который включает в себя электродуговую металлизацию с последующим синтезом. Изучены микроструктуры и эксплуатационные характеристики защитных покрытий втулок.

Ключевые слова: защитное покрытие, отходы промышленного производства, металлизация, оксидокерамическое покрытие, износостойкость.

The process for deposition of combined protective coating on bushes the sleeves made from industrial wastes has been studied in the paper. The process of coating deposition which includes arc spraying with the following synthesis has been described. The microstructures and performances of protective coating for bushes have been studied.

Keywords: protective coating, industrial wastes, plating, oxide ceramic coating, durability.

1. Денисова Н. Е. Триботехническое материаловедение и трибология: уч. пособие. – Пенза: ПГУ, 2006. – 248 с.
2. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В. Д. Зозуля, Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, Э. Д. Браун. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наукова думка, 1990. – 264 с.
3. Патент України № 63558, А МПК 7 В22F9/04. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва / В. Д. Рудь, Т. Н. Гальчук, О. Ю. Повстяной. – Заявл. 06.05.2003. – Опубл. 15.01.2004. – Бюл. № 1.
4. Повстяной О.Ю. Удосконалення технології виготовлення пористих порошкових матеріалів з використанням відходів промислового виробництва: дис. ... канд. техн. наук. – Луцьк, 2007. – 169 с.
5. Заболотний О. В. Використання модульних конструкцій при отриманні виробів методом радіально-ізостатичного пресування / О. В. Заболотний, Д. О. Сомов, О. Ю. Повстяной, В. А. Сичук // Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах (Міжнародна науково-технічна конференція): тези доповідей – Вінниця: ВНТУ, 2006. – С. 113–116.

6. *Патент України* на корисну модель МПК В22F 3/23. Реактор для проведення самопоширюючого високотемпературного синтезу (СВС-процесу) / Л. М. Самчук, Н. М. Гулієва, В. Д. Рудь та ін. – Заявл. 11.02.2014. – Опубл. 25.06.2014. – Бюл. № 12.
7. *Похмурський В. І.* Електродугові відновні та захисні покриття / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік та ін. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. – 200 с.
8. *Імбирович Н. Ю.* Розроблення оксидокерамічних покриттів на цирконієвих та титанових сплавах плазмоелектролітною обробкою: дис. ... канд. техн. наук. – Луцьк, 2006. — 125 с.
9. *Белозеров В. В.* Влияние химического состава алюминиевых сплавов на структуру и свойства МДО-покрытий / В. В. Белозеров, А. И. Махатилова, Е. М. Реброва и др. // Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. праць. – Тем. випуск «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХП». – 2005. – № 23. – С. 25–30.