

# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-9-15

УДК 621.793.71

**Олександр Пилипенко<sup>1</sup>, Володимир Ночвай<sup>2</sup>, Роман Симон<sup>3</sup>,  
Давид Храбан<sup>4</sup>, Володимир Погорильчук<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії  
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)  
E-mail: [chura.pilipenko255@ukr.net](mailto:chura.pilipenko255@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії  
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)  
E-mail: [nochvajvm@ztu.edu.ua](mailto:nochvajvm@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3742-0837>

<sup>3</sup>аспірант кафедри механічної інженерії  
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)  
E-mail: [romansymon@ztu.edu.ua](mailto:romansymon@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4965-2603>

<sup>4</sup>аспірант кафедри механічної інженерії  
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)  
E-mail: [khraban.david@gmail.com](mailto:khraban.david@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2621-2370>

<sup>5</sup>аспірант кафедри механічної інженерії  
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)  
E-mail: [vovan479dd@gmail.com](mailto:vovan479dd@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3559-2814>

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

*Наведено наявні в різних літературних джерелах рекомендації для вибору методів та матеріалів для отримання антифрикційних покриттів деталей машин. Приведено розроблений технологічний процес отримання антифрикційних покриттів методом газополуменевого наплення з використанням порошків марок БрКМц3-5, Бра10 та БраЖ10-1,5. Встановлено, що зносостійкість покриттів з БраЖ10-1,5, Бра10, БрКМц3-5 в порівнянні із зносостійкістю базових матеріалів збільшилась в 3...4 рази, у 2 рази та в 1,5 рази відповідно. Ваговий знос зразків із покриттями БраЖ10-1,5, Бра10, БрКМц3-5 менший, ніж ваговий знос зразків зі сталі 20Х без покриттів.*

*Ключові слова: матеріал наплення; технологія нанесення покриття; ваговий знос покриття; зносостійкість антифрикційних покриттів; випробування покриттів.*

*Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 10.*

**Постановка проблеми.** Одним із ефективних способів підвищення надійності та довговічності підшипників ковзання верстатів, машин та механізмів є нанесення на їх робочі поверхні зносостійких покриттів. Використання зносостійких покриттів при виготовленні підшипників ковзання дає можливість підвищити їхній ресурс роботи. Добитися високої зносостійкості робочої поверхні покриттів при їх мінімальній собівартості можна при правильному виборі покриттів та технології їх нанесення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі [1] проведено аналіз технологій відновлення геометричних розмірів вкладишів підшипників ковзання газоперекачувальних агрегатів методами ручного, відцентрового заливання та методом газополуменевого наплення. Автор роботи рекомендує з метою зменшення вартості й часу ремонту вкладишів підшипників використовувати метод газополуменевого наплення [1].

При виборі газотермічних покриттів необхідно враховувати такі критерії: службове призначення та умови роботи деталі; функції покриття; властивості основного матеріалу; необхідні властивості покриття на основному матеріалі деталі; конструктивні особливості поверхні з покриттям [2].

До числа методів нанесення покриттів, які активно розвиваються, належать метод газополуменевого наплення. Цим способом можна виготовляти і відновлювати деталі машин, у тому числі й підшипники ковзання. Метод забезпечує високу продуктивність, дозволяє отримати покриття у широкому діапазоні товщини (0,1-3,0 мм) і спектра властивостей [3].

Газополуменеве напилення є одним із простих серед методів газотермічного напилення покриттів. Це дешевий і зручний у керуванні метод, який використовує вихідні матеріали різної форми і стану: порошки, стрижні, дрiт. Джерелом енергії є полум'я горіння суміші пального газу з киснем [4]. Основні операційні параметри газополуменевого напилення: дистанція напилення 120...250 мм; максимальна температура поверхні деталі 250 °С. Пористість покриття 10...15 % [4].

Технологія газополуменевого напилення досить проста, а вартість обладнання та витрати на експлуатацію низькі. У зв'язку з цим даний спiсiб знайшов найбільш широке застосування в практиці. Технологічний процес газополуменевого нанесення покриттів дозволяє напилювати порошкоподібні і дотові матеріали, відмітною рисою є простота і мобільність устаткування, але невисока температура полум'я унеможливує нанесення тугоплавких матеріалів. Як пальне газу в більшості випадків використовують ацетилен, можна також застосовувати пропан та водень [5].

Автори роботи [6] замінили традиційний спiсiб відновлення антифрикційних властивостей підшипників ковзання газополуменевим напиленням. З метою усереднення коефіцієнтів термічного розширення і зниження ймовірності розтріскування покриття застосовували підшар ПТ-НА-01 [6].

З літературних джерел відомо, що для газотермічного напилення та наплавлення зносостійких та антифрикційних покриттів використовують порошки бронз. Кращі антифрикційні властивості мають олов'яні бронзи (БрО3Ц7С5Н1, БрО3Ц12С5, БрОФ6,5-0,44 та ін.) [7]. У важконавантажених вузлах тертя (дорожніх машин, важкого верстатного устаткування) застосовують високоміцні алюмінієві бронзи (БрА9Мц2, БрА9Ж4) [7]. Розроблені також порошки бронзи алюмінієвої БрА10 та бронзи олов'янофосфористі БрОФ-8-0,3, БрОФ-10-1 [8].

Для зміцнення вилок коробок передач автомобілів, бабітових підшипників, колодок опорних підшипників, напилення на деталі з конструкційних сталей, які працюють у морській воді (антифрикційні, зносостійкі в умовах змащування мастилом), застосовують порошкові матеріали марок: ПР-БрАЖНМц8,5-4-5-1,5; ПР-БрОН8,5-3; ПР-БрКМц3-1; ПР-БрМН40; ПР-БрОЦС5-5-5; ПР-БрА8,5. Для нанесення підшару покриття використовують порошок марки ПТ-НА-01 [9]. Для напилення покриттів на деталі машин та обладнання, які працюють в умовах корозії при підвищених температурах, та з метою отримання антифрикційних покриттів використовують порошки марок: ПГ-АН10(БрОФ-8-0,3); ПГ-АН11(БрОФ10-1); ПГ-АН12(БрА10); ПГ-АН13(МНМц-35-35); ПГ-АН14(МФ-9) [10].

**Метою статті** є розробка та дослідження газотермічних покриттів підшипників ковзання.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблений технологічний процес отримання антифрикційних газотермічних покриттів підшипників ковзання складається з наступних основних технологічних операцій: підготовки матеріалів напилення (просушування, просіювання порошку); підготовки деталі (очищення від бруду та мастила; зняття залишків нерівномірного спрацювання; знежирювання поверхні; формування шорсткості поверхні); нанесення шару покриття; механічної обробки відновленої поверхні деталі; вихідного контролю якості.

Для отримання антифрикційних покриттів вибрані порошки марок: БрКМц3-5; БрА10; БрАЖ10-1,5. Як підшару покриття застосовано порошок ПТ-НА-01.

Перед напиленням порошки просували при температурі 100...120 °С протягом 2 годин. Розділення порошоків на фракції виконано з використанням механічного сита моделі 029. Для напилення використано порошки з розміром частинок 40...160 мкм.

Операція підготовки деталей та зразків-свідків для нанесення покриттів складається з наступних переходів: очищення від забруднень; зняття залишків нерівномірного спрацювання; знежирювання поверхні; формування шорсткості поверхні шляхом абразивно-струменевої обробки поверхонь корундом при тиску повітря 0,5...0,6 МПа і відстані від сопла до поверхні 80...100 мм.

Напилення покриттів виконано з використанням газополуменевої установки мод. Л5405А. Деталі типу «вал» закріплювали в центрах маніпулятора обертання деталі (установка КНПА-1), а плоскі деталі розміщували на робочому столі установки. На супорті установки КНПА-1 встановлювали пістолет-розпилювач установки Л5405А.

Попереднє нагрівання виробу до температури 150...250 °С виконувалось полум'ям пістолета-розпилювача. Після нагрівання деталі виконано напилення допоміжного (товщина 0,3...0,5 мм) та основного шару покриття (товщина 1...1,5 мм). Як робочий газ використано кисень, пропан-бутан та стиснуте повітря (табл. 1).

Таблиця 1 – Технологічні режими напилювання та механічної обробки покриттів

№ з/п	Параметр	Значення параметра
1.	Тиск кисню, МПа	0,5
2.	Витрати кисню, л/хв	40
3.	Тиск пропан-бутану, МПа	0,1
4.	Витрати пропан-бутану, л/хв.	18
5.	Тиск стиснутого повітря, МПа	0,1
6.	Витрати стиснутого повітря (охолоджувального), л/хв	12
7.	Витрати стиснутого повітря (транспортуючого), л/хв	5
8.	Витрати порошкових матеріалів, кг/год	3
9.	Дистанція напилювання, мм	200
10.	Чорнова обробка: – швидкість різання, м/хв – подача, мм/об. – глибина різання, мм. – матеріал різального інструменту	20...25 0,15...0,2 0,3...0,4 ВКЗ, гексаніт
11.	Фінішна обробка: – швидкість різання, м/хв – подача, мм/об. – глибина різання, мм – матеріал різального інструменту	25...30 0,1...0,15 0,15...0,2 гексаніт, ельбор-Р

Джерело: розроблено авторами.

Після відновлення деталі виконано візуальний огляд, контроль твердості та шорсткості відновленої поверхні, контроль розмірів та форми деталі.

Розроблені антифрикційні покриття наносили також на зразки-свідки для досліджень їхніх властивостей. Дослідження порівняльної зносостійкості зразків еталонних деталей та антифрикційних покриттів проводились на машині тертя. Схема контакту зразків при терті ковзанням: вал – пальчиковий зразок. Зразки для випробувань виготовлено у відповідності з рис. 1 та рис. 2.

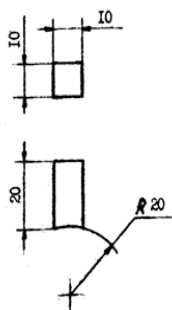


Рис. 1. Нерухомий зразок з напиленим покриттям для випробувань на машині тертя

Джерело: розроблено авторами.

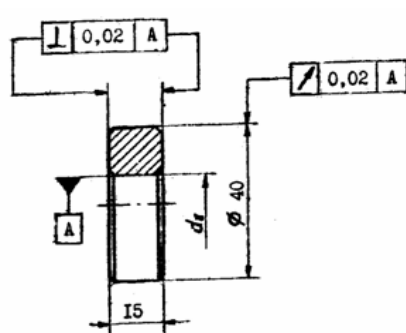


Рис. 2. Рухомий (що обертається) зразок для випробувань на машині тертя

Джерело: розроблено авторами.

Нерухомий зразок виготовлено зі сталі. Покриття напилено на ввігнуту поверхню зразка, що випробовують. Рухомий зразок (що обертається) виготовлено із загартованої сталі з твердістю HRC 45...50. При терті ковзання базових та напилених зразків по циліндричній поверхні рухомих зразків виконана оцінка їхньої зносостійкості.

По середньоарифметичним значенням результатів дослідів побудовані графіки залежності лінійного зносу зразків від часу випробувань (рис. 3) та графіки залежності зміни зносу від навантаження зразків (рис. 4).

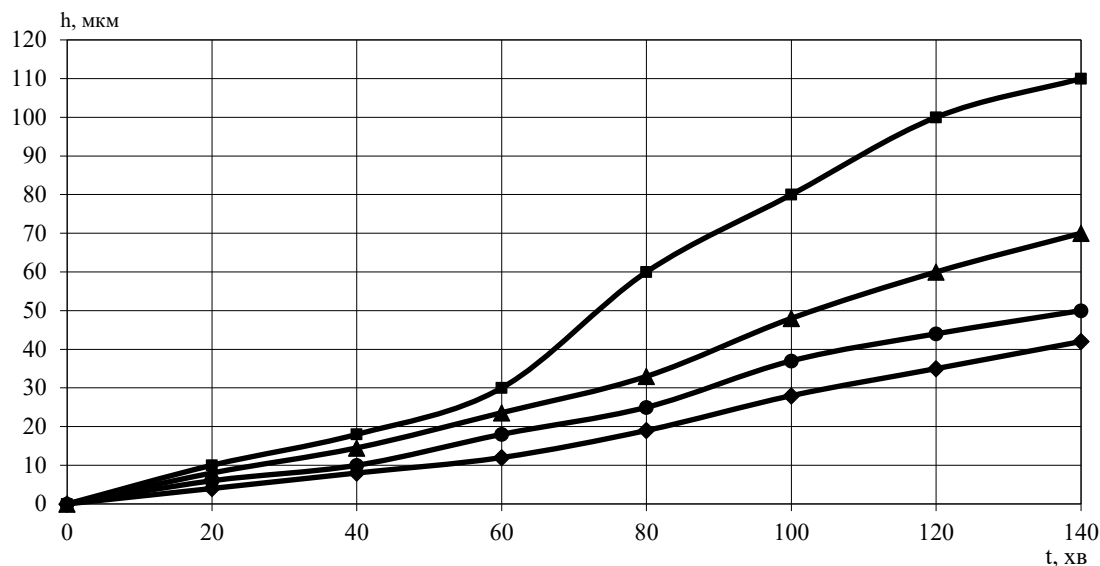


Рис. 3. Залежність лінійного зносу зразків від часу випробувань:

■ – базові зі сталі 20X; ▲ – напилене покриття з БрКМц3-5;

● – напилене покриття з БрА10; ◆ – напилене покриття з БрАЖ10-1,5

Джерело: розроблено авторами.

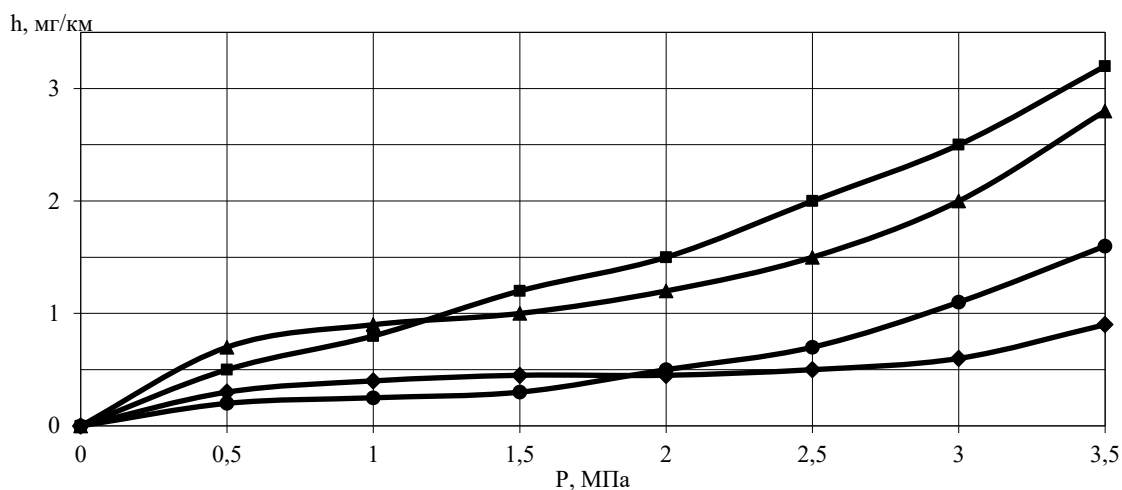


Рис. 4. Зміна зносу від навантаження рухомих зразків із сталі 45 (■, ▲), випробуваних відповідно з нерухомими зразками зі сталі 20X та покриттям БрКМц3-5 (●, ◆)

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз результатів експерименту показав, що найменшу зносостійкість мають базові зразки, а найбільшу – газотермічні покриття з БрАЖ10-1,5. Залежності вагового зносу, приведені до 1000 метрів шляху, підтверджують кращу зносостійкість напилених покриттів. Встановлено, що зносостійкість покриттів з БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 в порівнянні із зносостійкістю базових матеріалів збільшилась в 3...4 рази, в 2 рази та в 1,5 рази відповідно.

При екстремальних режимах тертя зразків швидкість ковзання більше впливає на знос, ніж питоме навантаження. Це відбувається тому, що висока швидкість ковзання характеризується більшою концентрацією тепла в поверхневих шарах зразків. При невеликій швидкості має місце більш рівномірне температурне поле. При збільшенні навантаження при постійній швидкості ковзання спостерігаються незначні зміни температурного градієнта.

**Висновки.** Вивченням зносостійкості зразків з покриттями на основі сплавів БрАЖ10-1,5, БрАЖ10, БрКМц3-5 та зразків зі сталі 20Х встановлено, що в досліджених режимах випробувань зразків із покриттями знос менший, ніж базових. Зносостійкість покриттів з БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 в порівнянні із зносостійкістю базових матеріалів збільшилась у 3...4 рази, в 2 рази та в 1,5 рази відповідно. Ваговий знос зразків із покриттями БрАЖ10-1,5, БрА10, БрКМц3-5 менший, ніж ваговий знос зразків зі сталі 20Х без покриттів. При екстремальних режимах тертя зразків більше впливає на знос швидкість ковзання, ніж питоме навантаження.

Розроблені антифрикційні покриття на основі міді відповідають сучасному рівню і можуть бути рекомендовані для отримання зносостійких покриттів на деталях при їх серійному випуску та відновленню спрацьованих деталей в ремонтних підприємствах.

### Список використаних джерел

1. Діденко, О. Л. Відновлення геометричних розмірів вкладишів підшипників ковзання газоперекачувальних агрегатів / О. Л. Діденко // Проблеми тертя та зношування. – 2010. – № 54. – С. 88-94.
2. Критерии выбора материала покрытия и метода газотермического напыления / Ю. А. Харламов, Л. Г. Полонский, Ю. О. Нагорняк, В. Н. Наумчук, В. А. Яновский // Вісник НУБіП. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2017. – № 258. – С. 236-246.
3. Анализ методов повышения качества подшипников скольжения / Н. А. Зенкин, Н. В. Тарельник, А. Е. Коноплянченко, К. Антошевский, А. Д. Лазаренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 55-60.
4. Харламов, Ю. А. Газотермическое напыление, современное состояние и перспективы развития / Ю. А. Харламов, Л. Г. Полонский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2016. – № 2. – С. 5-19.
5. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки ; пер. с яп. В. Н. Попова ; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
6. Гавриш П. А. Газотермическое напыление антифрикционного покрытия деталей перегружателя TAKRAF / П. А. Гавриш, Е. В. Бережная, Е. А. Соболев-Бутовченко // Науковий Вісник Донбаської державної машинобудівної академії – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія, 2016. – № 2. – С. 49-54.
7. Добровольський, О. Г. Сучасні антифрикційні матеріали / О. Г. Добровольський, В. А. Косенко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Серія: Будівельні машини і технологічне обладнання. – Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2016. – № 88. – С. 55-63.
8. Борисов, Ю. С. Порошки для газотермического напыления покрытий / Ю. С. Борисов. – К. : Знание, 1984. – 16 с.
9. Газотермическое напыление покрытий : [сб. рук. техн. матер. / ред. Е. Н. Казарова]. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. – 176 с.
10. Порошки металлические : ТУ 374-83. – К. : ЛОП ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. – 7 с.

### References

1. Didenko, O.L. (2010). Vidnovlennia heometrychnykh rozmiriv vkladyshev pidshypnykiv kovzannia hazoperekachuvalnykh ahrehativ [Renovation of geometrical expansions of bushings in bearings forging of gas pumping units]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems*, (54), 88–94.

2. Kharlamov, Yu.A., Polonsky, L.G., Nagorniak, Yu.O., Naumchuk, V.N., & Yanovsky, V.A. (2017). Kriterii vybora materiala pokrytija i metoda gazotermicheskogo napyleniia [Criteria for the selection of the coating material and the method of thermal spraying]. *Visnyk nacionalnogo universitetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy – Scientific Herald of national University of life and enviromental Science of Ukraine*, (258), 236–246.

3. Zenkin, M.A., Tarelnik, N.V., Konoplyanchenko, A.E., Antoshevskii, K., & Lazarenko, A.D. (2017). Analiz metodov povysheniya kachestva podshipnikov skolzheniya [Analysis of methods for improving the quality of plain bearings]. *Kompressoroe i jenergeticheskoe mashinostroenie – Compressor and power engineering*, (2), 55-60.

4. Kharlamov, Yu.A., & Polonsky, L.G. (2016). Gazotermicheskoe napylenie, sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija [Thermal spraying, current state and development prospects]. *Visnyk Skhidnoukrains'koho natsionalnogo universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (2), 5–19.

5. Hasui, A., & Morigaki, O. (1985). *Naplavka i napylenie [Surfacing and spraying]. Mashinostroenie.*

6. Gavrish, P.A., Berezhnaya, E.V., & Sobolev-Butovchenko, E.A. (2016). Gazotermicheskoe napylenie antifrikcionnogo pokrytija detalej peregruzhatelja TAKRAF [Thermal spraying of antifriction coating of TAKRAF material handling equipment]. *Naukovyj Visnyk Donbas'koi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii – Scientific Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy*, (2), 49–54.

7. Dobrovolsky, O.G., & Kosenko, V.A. (2016). Suchasni antyfryksijni materialy [Modern anti-friction materials]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, construction, road and reclamation machines*, (88), 5563.

8. Borisov, Yu.C. (1984). *Poroshki dlja gazotermicheskogo napylenija pokrytij [Powders for thermal spraying of coatings].* Obshhestvo «Znanie».

9. Kazarova, E.N. (Ed). (1990). *Gazotermicheskoe napylenie pokrytij [Thermal spraying of coatings].* Institut elektrosvarki imeni E.O Patona.

10. Institut elektrosvarki imeni E.O. Patona. (1983). *Poroshki metallicheskie (TU IES 374-83) [Metallic powders TU IES 374-83].*

Отримано 21.04.2023

UDC 621.793.71

**Oleksandr Pylypenko<sup>1</sup>, Volodymyr Nochvai<sup>2</sup>, Roman Symon<sup>3</sup>,  
Davyd Khraban<sup>4</sup>, Volodymyr Pohorylchuk<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [chura.pilipenko255@ukr.net](mailto:chura.pilipenko255@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>

<sup>2</sup>Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [nochvajvm@ztu.edu.ua](mailto:nochvajvm@ztu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3742-0837>

<sup>3</sup>Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [romansymon@ztu.edu.ua](mailto:romansymon@ztu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4965-2603>

<sup>4</sup>Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [khraban.david@gmail.com](mailto:khraban.david@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2621-2370>

<sup>5</sup>Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [vovan479dd@gmail.com](mailto:vovan479dd@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3559-2814>

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THERMAL SPRAYING COATINGS OF SLIPPING BEARINGS

*The use of anti-friction thermal coatings at the stage of manufacturing of machinery, machine and mechanism components opens new opportunities for increasing the working life of parts. The article analyzes the recommendations available in different literature sources for the choice of methods of obtaining anti-friction coating of machine parts. It is noted that the following criteria should be taken into account when selecting thermal coatings: service appointment; working conditions of details; coverage functions; properties of the basic material; necessary coating properties; constructive features of the surface with coating; limitation by applying method selection.*

*Bronze is included in the anti-friction materials. The best anti-friction properties have tin bronze. In the units of friction machines, heavy equipment are used high-strength aluminum bronze.*

*For anti-friction coating, the method of oxy-fuel coating spraying is selected. The method has a number of advantages: simplicity of the equipment, cheap and easy to manage method, the restored part has a flat surface. The developed technological process of coating spraying consists of the following basic operations: preparation of parts, preparation of powder, coating on a part, mechanical processing, output control.*

*For obtaining anti-friction coating there are powder alloys of following grades selected: BrkMts3-5; BrA10; BrAZ10-1,5. As a layer of coating powder of the PA-ON-01 brand is used. The coating was applied to the details of the machines and as witness samples for the investigation of their properties. The comparative wear resistance of samples of standard parts and parts with anti-friction coating was studied on the friction machine.*

*It has been found that wear resistance of coatings from Bráz10-1,5, BrA10, Brkmts3-5 in comparison with wear resistance of base materials increased in 3...4 times, in 2 times and in 1,5 times respectively.*

*The developed anti-friction coating can be recommended for receiving protective coatings on the parts at their serial release and restoration of the processed parts in the repair enterprises.*

**Key words:** *spray material; coating technology; weight depreciation of the coating; depreciation resistance of anti-friction coating; tests of coatings.*

*Fig.: 4. Table: 1. References: 10.*