

Структура та властивості багатошарових покриттів, синтезованих методом електроіскрового легування

Гапонова О. П., доктор технічних наук, професор, професор кафедри,
gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>

Лапоног Г. П., аспірант, glaponog@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7538-4682>

Смоленко С. В., аспірант, stassmolenko@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0107-5980>

Чижов В. В., студент, vadim33332564@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3878-6604>

Сумський державний університет, Суми, Україна

Бронзи, зокрема олов'яністі та алюмінієві, широко застосовуються як антифрикційні матеріали у вузлах ковзання машинобудівного та енергетичного обладнання завдяки поєднанню низького коефіцієнта тертя, зносостійкості та корозійної стійкості. Однак їх експлуатаційна надійність обмежується інтенсивним зношуванням у період припрацювання, під час якого локальні перевантаження та мікронерівності поверхонь призводять до адгезійного зносу і задирів, що знижує ефективність роботи вузлів тертя. Метою роботи є дослідження структури та властивостей багатошарових покриттів, синтезованих методом електроіскрового легування (ЕІЛ) на бронзовій підкладці з використанням сірковмісної пасту. Зразки бронзи БрО10С10 обробляли на установці «Елітрон-22А» за різними режимами енергії розряду. Під час ЕІЛ пасту наносили перед легуванням сріблом і оловом у послідовності: паста → ЕІЛ сріблом → ЕІЛ оловом → паста → ЕІЛ сріблом. Визначали шорсткість і топографію поверхні, досліджували розподіл мікротвердості та елементів в поверхневому шарі, аналізували мікроструктуру багатошарового покриття. Використовували растрову і світлову мікроскопію. Результати показали формування багатошарової структури: зовнішній шар з мікротвердістю 140-150 МПа, світліший підшар – 1250-2270 МПа, зона термічного впливу – 778-1000 МПа. Виявлено інтенсивну дифузію матеріалів електродів (Sn, Ag) та проникнення сірки у бронзову підкладку. Використання сірковмісної пасту забезпечує кероване формування структури та складу, підвищує адгезію покриття. Дослідження підтверджують, що процес ЕІЛ дозволяє отримати покриття із заданими механічними характеристиками, що особливо важливо для вузлів тертя складної конфігурації та високих навантажень. Таким чином, застосування ЕІЛ із функціональними пастами є перспективним підходом для модифікації бронзових деталей, оптимізації процесу

припрацювання та керування властивостями поверхневих шарів, відкриваючи можливості для створення покриттів з високою адгезією, підвищеною зносостійкістю та керованим складом для сучасного машинобудування й енергетики.

Ключові слова: *бронза, електроіскрове легування, сірковмісна паста, багат шарові покриття, властивості*

Бронзи, зокрема олов'янисті та алюмінієві, широко застосовуються як антифрикційні матеріали у вузлах ковзання машинобудування, авіаційної техніки, гідравлічних систем та енергетичного обладнання [1]. Однак, незважаючи на сприятливе поєднання низького коефіцієнта тертя, корозійної стійкості та задовільної зносостійкості, їх експлуатаційна надійність обмежується інтенсивним зношуванням на початкових стадіях роботи. Найбільш важливою є стадія припрацювання, під час якої через мікронерівності та відхилення геометрії контактних поверхонь виникають локальні перевантаження, що призводять до адгезійного зносу, задирів і схоплювання.

Сучасні дослідження свідчать, що трибологічні властивості бронз визначаються не лише їх хімічним складом, а передусім мікроструктурою, фазовим складом і станом поверхневого шару [2-4]. Важливе значення для підвищення зносостійкості та стабільності роботи вузлів тертя має структурний стан приповерхневих шарів, який формується в процесі обробки та обумовлює триботехнічні характеристики матеріалу. У зв'язку з цим актуальним є розвиток методів поверхневої інженерії, які дозволяють формувати функціональні покриття з керованими властивостями. Детальні огляди сучасних підходів наведено, зокрема, у роботах [5-7]. На сьогодні доведено, що модифікація поверхні бронз різними методами (PVD – physical vapor deposition (фізичне осадження з парової фази), CVD – chemical vapor deposition (хімічне осадження з парової фази), газотермічне напилення тощо) дозволяє суттєво покращити їх триботехнічні характеристики. Зокрема, показано, що PVD-покриття забезпечують зниження коефіцієнта тертя та підвищення зносостійкості за рахунок формування оптимальної мікроструктури та інтерметалідних фаз [8]. Також встановлено ефективність холодного газодинамічного напилення для отримання щільних покриттів алюмінієвих бронз із покращеними механічними властивостями [9]. Окремий напрям пов'язаний із застосуванням електроіскрового легування (ЕІЛ), яке забезпечує формування зміцнених шарів із високою адгезією та керованим фазовим складом [10, 11].

Незважаючи на значні досягнення, питання оптимізації структури приповерхневого шару бронз для покращення процесу припрацювання залишається відкритим. Недостатньо дослідженими є механізми формування багатокомпонентних покриттів при ЕІЛ щодо контролю складу та морфології поверхневого шару. Такі покриття формують міцний приповерхневий шар з високою адгезією до бронзової основи та знижують коефіцієнт тертя, що сприяє підвищенню зносостійкості та підвищують ресурс вузлів тертя.

Порівняно з традиційними методами модифікації поверхні, ЕІЛ характеризується високою адаптивністю до складних геометрій деталей, можливістю локальної обробки без значної теплової деформації основного

матеріалу, а також відсутністю потреби у спеціальному газовому середовищі чи високотемпературних технологічних процесах [11-13]. Технологія дозволяє застосовувати широкий спектр електродних матеріалів, що відкриває можливості для цілеспрямованого керування складом та властивостями сформованих покриттів. Так, показано, що процес ЕІЛ може проводитися у спеціальних пастах, які містять необхідні компоненти, що беруть участь у формуванні покриття та його легуванні, забезпечуючи утворення заданих фаз [14]. Зокрема, використання сірковмісних паст у поєднанні з молібденовим електродом під час ЕІЛ призводить до формування покриттів з дисульфідом молібдену (MoS_2). Такі покриття на сталевій підкладці демонструють покращені триботехнічні властивості, що підтверджується результатами трибологічних випробувань [15]. У зв'язку з цим застосування паст при ЕІЛ є перспективним підходом для модифікації поверхні бронзових деталей, що дозволяє покращити процес припрацювання та знизити коефіцієнт тертя.

Метою роботи є дослідження структури та властивостей багат шарових і багатокомпонентних антифрикційних покриттів, синтезованих методом електроіскрового легування на бронзовій підкладці із використанням сірковмісної паст.

Бронза марки БрО10С10 є поширеним антифрикційним матеріалом для вкладишів і підкладок підшипників ковзання завдяки оптимальному поєднанню міцності, зносостійкості та самозмащувальних властивостей, що забезпечується комплексним легуванням міді оловом і свинцем. Її вибір для дослідження як підкладкового матеріалу обґрунтований здатністю працювати при значних питомих навантаженнях і терті по загартованій сталі. Такі умови є типовими для енергетичного обладнання з високими швидкостями обертання та змінними режимами навантаження, у вузлах якого широко застосовуються підшипники ковзання.

Для проведення досліджень виготовляли зразки із бронзи розміром $15 \times 15 \times 6$ мм, що постачалася у литому стані без додаткової термічної обробки, з твердістю $\text{HV} \approx 90-130$.

ЕІЛ поверхонь зразків здійснювали на установці «Елітрон-22А». Як аноди використовували електроди у формі дроту діаметром 4 мм та довжиною 20 мм, виготовлені зі срібла ($\text{Ag } 99.9$) та олова ($\text{Sn } 99.9$). ЕІЛ виконували на установці «Елітрон 22А» за режимами, що подані в табл. 1.

Процес формування покриттів здійснювали за схемою, що передбачала формування модифікованих шарів із застосуванням сірковмісної паст. Паста була приготовлена на основі вазеліну та містила порошок чистої елементарної сірки (33,3% за масою). Обробку виконували в наступній послідовності: спочатку наносили пасту, після чого проводили електроіскрове легування сріблом, далі – легування оловом, а на завершення повторно наносили пасту і виконували легування сріблом. Пасту наносили безпосередньо перед кожним етапом сріблення тонким рівномірним шаром товщиною приблизно 50-150 мкм, що забезпечувало заповнення мікронерівностей поверхні, зумовлених її шорсткістю. Для забезпечення низьких значень шорсткості останній прохід сріблення (третій етап) виконували при зниженій енергії розряду в діапазоні 0,05-0,36 Дж (табл. 1).

Таблиця 1
Технологічні режими ЕІЛ

Table 1
ESA operating conditions

Енергія розряду ЕІЛ, W _p (Дж)	Номер режиму		
	1	2	3
	Ag		
	4.60	4.60	4.60
	Sn		
	0.36	0.90	4.60
	Ag		
	0.36	0.36	0.36

Шорсткість поверхні після ЕІЛ визначали за допомогою профілографа-профілометра мод. 201 виробництва заводу «Калібр» шляхом реєстрації та подальшої обробки профілограм. Металографічний аналіз покриттів проводили з використанням металографічного мікроскопа МІМ-7. Для виявлення мікроструктури проводили хімічне травлення в розчині хлориду заліза (FeCl₃).

Дослідження мікротвердості здійснювали на приладі ПМТ-3. Підготовку зразків виконували відповідно до стандартних методик [16]. Топографію поверхні і розподіл хімічних елементів у поверхневому шарі досліджували методом растрової електронної мікроскопії з використанням електронного мікроскопа РЕМ-106, оснащеного камерою низького вакууму та системою енергодисперсійного мікроаналізу.

Аналіз топографії поверхні після ЕІЛ показав, що характер мікрорельєфу практично не залежить від технології обробки, оскільки в усіх випадках завершальним етапом було легування сріблом при енергії розряду 0,36 Дж (табл. 1 і рис. 1). Відомо [17], що параметри шорсткості при ЕІЛ визначаються енергією розряду: її зростання супроводжується інтенсифікацією теплового впливу, плавленням матеріалу та формуванням глибших кратерів і розвиненого мікрорельєфу, що призводить до збільшення шорсткості. Водночас застосування завершальної обробки на знижених

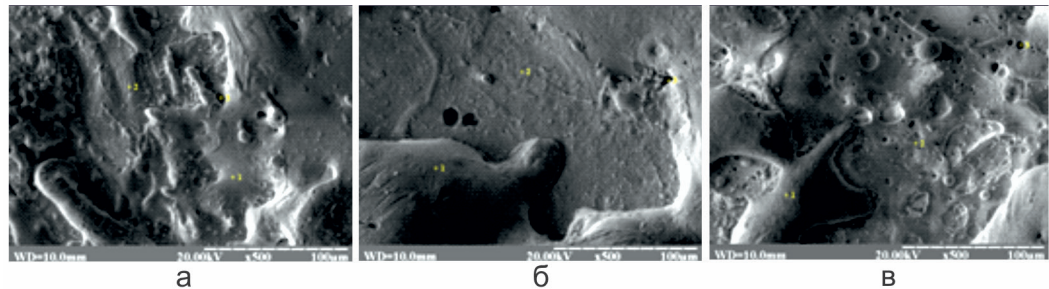


Рис. 1. РЕМ поверхні після ЕІЛ за режимами 1, 2 і 3, відповідно, а, б і в.

Fig. 1: SEM images of the surface after ESA in modes 1, 2, and 3 (shown in (a), (b), and (c), respectively).

енергіях сприяє частковому переплавленню виступів і згладжуванню поверхні, що забезпечує зменшення шорсткості. Значення шорсткості поверхні після оброблення подані у табл. 2.

Таблиця 2
Параметри отриманих покриттів

Table 2
Parameters of the coatings obtained

Режим	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
1	530-670	140	100	10-20	1250	100	6,5-7,5	60	1300-1500
2	700-1750	150		10-30	1730			90	1457-1685
3	2030-2740	130-150			2270			110	1650-2410

Металографічний аналіз покриттів показав, що в усіх випадках формується багатошарова структура, яка включає зовнішній шар, світліший підшар, зону термічного впливу та основний метал. Структура має виражений диференційований характер, товщина окремих зон і їх мікротвердість залежать від енергії розряду. На рис. 2 а наведено мікроструктуру нетравленого зразка з покриттям, що зумовлено труднощами отримання

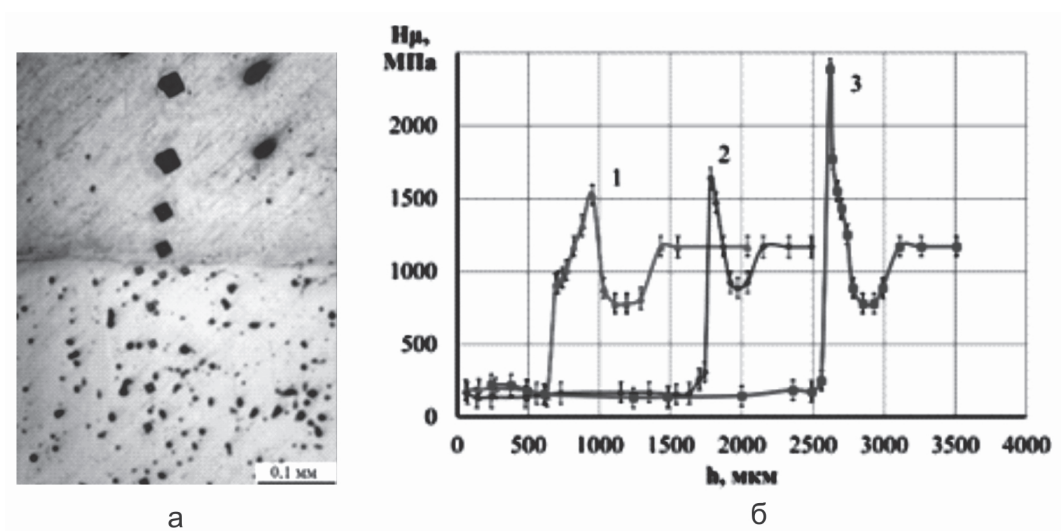


Рис. 2. Мікроструктура (без травлення) – (а) і розподіл мікротвердості поверхневого шару зразків, оброблених за режимами 1, 2, 3 – (б).

Fig. 2. Microstructure (without etching) – (a) and distribution of microhardness in the surface layer of samples treated in modes 1, 2 and 3 – (б).

якісних зображень після травлення через відмінності у травимості окремих шарів у реактиві.

Зовнішній шар характеризується нерівномірною товщиною та відносно низькою мікротвердістю (табл. 2). За режиму обробки 1 його товщина становить 530-670 мкм, тоді як при режимі 3, що передбачає використання підвищених енергій розряду, – 2030-2740 мкм. При цьому мікротвердість шару 140-150 МПа. Суцільність зовнішнього шару в усіх досліджених зразках відповідає 100 %. Формування масивного поверхневого шару зумовлене багаторазовим локальним плавленням і перенесенням матеріалу електрода з подальшою кристалізацією у вигляді нашарувань.

Під зовнішнім шаром формується світліший підшар товщиною 10-20 мкм, який добре виявляється під час хімічного травлення. Він характеризується значно вищою мікротвердістю порівняно із зовнішнім шаром: для режиму 1 – близько 1250 МПа, для режиму 3 – до 2270 МПа (табл. 2). Підвищена твердість цієї зони зумовлена інтенсивним перемішуванням матеріалу електрода з основою та формуванням зміцненої структури внаслідок швидкої кристалізації розплаву. Підшар формується в умовах імпульсного плавлення і зберігає максимальні значення твердості навіть за наявності сірки.

Нижче підшару формується зона термічного впливу, товщина якої зростає зі збільшенням енергії розряду. Мікротвердість цієї зони становить 778-1000 МПа. Порівняно невисокі значення твердості свідчать про структурні перетворення бронзи, зумовлені імпульсним тепловим впливом.

Аналіз розподілу елементів у приповерхневих шарах показав, що при ЕІЛ із використанням сірковмісної пасти відбувається інтенсивна дифузія матеріалів електрода (Sn і Ag) у бронзову основу, а також проникнення сірки в покриття. Глибина дифузійної зони для сірки зростає зі збільшенням енергії розряду і досягає ~200 мкм, для срібла – до ~225 мкм, що свідчить про інтенсивне перемішування матеріалів електрода з пастою та їх дифузійне проникнення в підкладку. Зі зростанням енергії розряду спостерігається розширення дифузійної зони. Це вказує на те, що процес електроіскрового легування супроводжується одночасними процесами локального переплавлення, масоперенесення та дифузії, що забезпечує формування багат шарової структури з підвищеною адгезією покриття до основи.

Таким чином, проведені дослідження показали, що ЕІЛ бронз із застосуванням сірковмісної пасти забезпечує формування багат шарових покриттів з вираженою диференційованою структурою: зовнішній шар, світліший підшар, зона термічного впливу та основний метал. Зовнішній шар характеризується відносно низькою мікротвердістю (140-150 МПа) і повною суцільністю. Його параметри зумовлені багаторазовим локальним плавленням і перенесенням матеріалу електрода з подальшою кристалізацією у вигляді нашарувань. Світліший підшар товщиною 10-20 мкм має найвищу мікротвердість (1250-2270 МПа). Зона термічного впливу характеризується мікротвердістю 778-1000 МПа. Порівняно низькі значення твердості свідчать про структурні перетворення бронзи, спричинені імпульсним тепловим впливом під час ЕІЛ. Дослідження розподілу елементів показали інтенсивну

дифузію матеріалів електрода (Sn і Ag) у бронзову підкладку та проникнення сірки у покриття. Використання сірковмісної пасти під час ЕІЛ дозволяє цілеспрямовано керувати структурою і морфологією поверхневого шару. Застосування ЕІЛ у поєднанні зі спеціальними пастами є перспективним підходом для модифікації поверхні бронзових деталей, що відкриває можливості для підвищення експлуатаційної надійності антифрикційних матеріалів у вузлах ковзання.

Відомості про фінансування дослідження.

Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за підтримку науково-дослідного проєкту № 0124U000539, а також Національному фонду досліджень України за підтримку проєкту № 2025.07/0115.

Література

1. Kallio M., Vuorinen P., Fuentes E., Maraca O., Ruusila V., Nyssanen T., Kuokkala V. T., Lehtovaara A. Tribological Behavior of Bronze Alloys with Solid Lubricants // Key Engineering Materials. – 2012. – Vol. 527. – P. 205-210. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.527.205>
2. Kelemesh A., Gorbenko O., Dudnikov A., Dudnikov I. Research of wear resistance of bronze bushings during plastic vibration deformation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, № 11 (86). – P. 16-21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97534>
3. Wang X., Tang B., Wang L., Dong D., Dong W., Li X. Microstructure, Microhardness and Tribological Properties of Bronze–Steel Bimetallic Composite // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 4. – Art. 1588. <https://doi.org/10.3390/ma15041588>
4. Shaik M. A., Gollab B. R. Microstructure, mechanical and wear property correlation of Al bronze alloys // Powder Metallurgy. – 2023. – Vol. 66, № 1. – P. 54-63. <https://doi.org/10.1080/00325899.2022.2079183>
5. Davis J. R. Surface engineering for corrosion and wear resistance / ed. J. R. Davis. – Materials Park: ASM International, 2001. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.secwr.9781627083157>
6. Blau P. J. Friction science and technology. – Boca Raton: CRC Press, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781420054101>
7. Bhushan B. Introduction to tribology. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118403228>
8. Hao W., Larbi A., Dong H., Wang D., Li S. A comparative investigation on wear behaviors of physical and chemical vapor deposited bronze coatings for hydraulic piston pump // Chinese Journal of Aeronautics. – 2024. – Vol. 37, № 3. – P. 391-403. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.004>
9. Winnicki M., Baszczuk A., Gibas A., Jasierski M. Experimental study on aluminium bronze coatings fabricated by low pressure cold spraying and subsequent heat treatment // Surface & Coatings Technology. – 2023. – Vol. 456. – Art. 129260. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129260>
10. Solovykh E., Shepelenko I., Chernovol M., Mahopets S., Solovuch A., Katerynych S. Optimization of the technology for applying discrete coatings in restoration of

- bronze parts by electrospark alloying // Problems of Tribology. – 2023. – Vol. 28, № 1. – P. 51-58. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-51-58>
11. Haponova O., Tarelnyk V., Tarelnyk N. et al. Hybrid surface treatment technologies based on the electrospark alloying method: A review // Coatings. – 2025. – Vol. 15, № 6. – Art. 721. <https://doi.org/10.3390/coatings15060721>
12. Penyashki T., Kostadinov G.D., Kandeve M.K. Improvement of the surface properties of carbon steel through electrospark coatings from multicomponent hard alloys // Materials. – 2025. – Vol. 18, № 10. – Art. 2211. <https://doi.org/10.3390/ma18102211>
13. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Y.V. Electric-spark alloying of metal surfaces with graphite // Progress in Physics of Metals. – 2022. – Vol. 23, № 1. – P. 27-58. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.01.027>
14. Gaponova O.P., Tarelnyk V.B., Antoszewski B., Radek N., Tarelnyk N.V., Kurp P., Myslyvchenko O.M., Hoffman J. Technological features for controlling steel part quality parameters by the method of electrospark alloying using carburezer containing nitrogen-carbon components // Materials. – 2022. – Vol. 15. – Art. 6085. <https://doi.org/10.3390/ma15176085>
15. Gaponova O.P., Antoszewski B., Tarelnyk V.B., Kurp P., Myslyvchenko O.M., Tarelnyk N.V. Analysis of the quality of sulfomolybdenum coatings obtained by electrospark alloying methods // Materials. – 2021. – Vol. 14. – Art. 6332. <https://doi.org/10.3390/ma14216332>
16. Caron R.N., Barth R.G., Tyler D.E. Metallography and Microstructures of Copper and Its Alloys // Metallography and Microstructures, ASM Handbook, ASM International. – 2004. – Vol 9. – P. 775-788. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003772>
17. Penyashki T., Kostadinov G., Kandeve M., Nikolov A., Dimitrova R., Kamburov V., Danailov P., Bozhkov S. Study of the influence of coating roughness on the properties and wear resistance of electrospark deposited Ti6Al4V titanium alloy // Tribology in Industry. – 2024. – Vol. 46, № 1. – P. 13-28. <https://doi.org/10.24874/ti.1508.06.23.08>

References

1. Kallio, M., Vuorinen, P., Fuentes, E., Maraca, O., Ruusila, V., Nyssanen, T., Kuokkala, V. T., & Lehtovaara, A. (2012). Tribological behavior of bronze alloys with solid lubricants. *Key Engineering Materials*, 527, 205-210. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.527.205>
2. Kelemesh, A., Gorbenko, O., Dudnikov, A., & Dudnikov, I. (2017). Research of wear resistance of bronze bushings during plastic vibration deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(11), 16-21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97534>
3. Wang, X., Tang, B., Wang, L., Dong, D., Dong, W., & Li, X. (2022). Microstructure, microhardness and tribological properties of bronze-steel bimetallic composite. *Materials*, 15(4), Article 1588. <https://doi.org/10.3390/ma15041588>
4. Shaik, M. A., & Gollab, B. R. (2023). Microstructure, mechanical and wear property correlation of Al bronze alloys. *Powder Metallurgy*, 66(1), 54-63. <https://doi.org/10.1080/00325899.2022.2079183>
5. Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.secwr.9781627083157>

6. Blau, P. J. (2008). *Friction science and technology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420054101>
7. Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118403228>
8. Hao, W., Larbi, A., Dong, H., Wang, D., & Li, S. (2024). A comparative investigation on wear behaviors of physical and chemical vapor deposited bronze coatings for hydraulic piston pump. *Chinese Journal of Aeronautics*, 37(3), 391-403. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.004>
9. Winnicki, M., Baszczuk, A., Gibas, A., & Jasiorski, M. (2023). Experimental study on aluminium bronze coatings fabricated by low pressure cold spraying and subsequent heat treatment. *Surface & Coatings Technology*, 456, Article 129260. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129260>
10. Solovykh, E., Shepelenko, I., Chernovol, M., Mahopets, S., Solovuch, A., & Katerynych, S. (2023). Optimization of the technology for applying discrete coatings in restoration of bronze parts by electrospark alloying. *Problems of Tribology*, 28(1), 51-58. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-51-58>
11. Haponova, O., Tarelnyk, V., & Tarelnyk, N. (2025). Hybrid surface treatment technologies based on the electrospark alloying method: A review. *Coatings*, 15(6), Article 721. <https://doi.org/10.3390/coatings15060721>
12. Penyashki, T., Kostadinov, G. D., & Kandeve, M. K. (2025). Improvement of the surface properties of carbon steel through electrospark coatings from multicomponent hard alloys. *Materials*, 18(10), Article 2211. <https://doi.org/10.3390/ma18102211>
13. Tarelnyk, V. B., Gaponova, O. P., & Konoplianchenko, Y. V. (2022). Electric-spark alloying of metal surfaces with graphite. *Progress in Physics of Metals*, 23(1), 27-58. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.01.027>
14. Gaponova, O. P., Tarelnyk, V. B., Antoszewski, B., Radek, N., Tarelnyk, N. V., Kurp, P., Myslyvchenko, O. M., & Hoffman, J. (2022). Technological features for controlling steel part quality parameters by the method of electrospark alloying using carburezer containing nitrogen-carbon components. *Materials*, 15, Article 6085. <https://doi.org/10.3390/ma15176085>
15. Gaponova, O.P., Antoszewski, B., Tarelnyk, V. B., Kurp, P., Myslyvchenko, O.M., & Tarelnyk, N. V. (2021). Analysis of the quality of sulfomolybdenum coatings obtained by electrospark alloying methods. *Materials*, 14, Article 6332. <https://doi.org/10.3390/ma14216332>
16. Caron, R. N., Barth, R. G., & Tyler, D. E. (2004). Metallography and microstructures of copper and its alloys. In *Metallography and microstructures* (ASM Handbook, Vol. 9, pp. 775-788). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003772>
17. Penyashki, T., Kostadinov, G., Kandeve, M., Nikolov, A., Dimitrova, R., Kamburov, V., Danailov, P., & Bozhkov, S. (2024). Study of the influence of coating roughness on the properties and wear resistance of electrospark deposited Ti6Al4V titanium alloy. *Tribology in Industry*, 46(1), 13-28. <https://doi.org/10.24874/ti.1508.06.23.08>

Одержано/Received 17.04.26

Прийнято до друку/Accepted 20.05.26

Опубліковано/Published 31.05.26

Investigation of the structure and properties of multilayer coatings on bronze synthesised by the electrospark alloying method

O. P. Haponova, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>

G. P. Laponog, Postgraduate Student, glaponog@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7538-4682>

S. V. Smolenko, Postgraduate Student, stassmolenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0107-5980>

V. V. Chyzhov, student, vadim33332564@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3878-6604>

Sumy State University, Sumy, Ukraine

Summary

Bronzes, particularly tin and aluminium bronzes, are widely used as antifriction materials in sliding units of machinery and energy equipment due to their combination of low friction coefficient, wear resistance, and corrosion resistance. However, their operational reliability is limited by intensive wear during the running-in period, when local overloads and surface micro-roughness lead to adhesive wear and scoring, reducing the efficiency of tribological components. The aim of this work is to investigate the structure and properties of multilayer coatings synthesized on bronze substrates by electrospark alloying (ESA) using a sulphur-containing paste. Samples of bronze BrO10S10 were treated on the "Elitron-22A" setup under various discharge energy modes. During ESA, the paste was applied before silver and tin alloying in the following sequence: paste → ESA with silver → ESA with tin → paste → ESA with silver. Surface roughness and topography were determined, and the distribution of microhardness and elements in the surface layer was analysed. The multilayer coating microstructure was studied using optical and scanning electron microscopy. Results revealed the formation of a multilayer structure: an outer layer with microhardness of 140-150 MPa, a lighter sublayer of 1250-2270 MPa, and a heat-affected zone of 778-1000 MPa. Intensive diffusion of electrode materials (Sn, Ag) and sulphur penetration into the bronze substrate were observed. The use of sulphur-containing paste enables controlled formation of structure and composition, enhancing coating adhesion. The study confirms that ESA can produce coatings with tailored mechanical properties, which is particularly important for tribological components with complex geometry and high loads. Therefore, the application of ESA with functional pastes is a promising approach for modifying bronze parts, optimizing the running-in process, and controlling surface layer properties, enabling the creation of coatings with high adhesion, enhanced wear resistance, and controlled composition for modern mechanical engineering and energy applications.

Keywords: bronze, electrospark alloying, sulphur-containing paste, multilayer coatings, properties