

НАНОСТРУКТУРУВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ

Гапонова О. П., Охріменко В. О., Смоленко С. В.
Сумський державний університет

Анотація. У роботі досліджено вдосконалення технології електроіскрового легування (ЕІЛ) сталевих поверхонь через використання спеціальних технологічних середовищ (СТС), що містять вуглецеві нанотрубки. Метою дослідження було підвищення якості металевих поверхневих шарів. Експерименти проводилися на зразках з Армко-заліза, ЕІЛ здійснювали молибденовим електродом. Як СТС використовували пасту, що містила нанотрубки. Для диспергування нанотрубок у СТС застосовувався метод ультразвукового перемішування. Під час дослідження впливу ЕІЛ на структуру аналізували, як зміна енергії розряду позначається на властивостях отриманих покриттів. Для порівняння досліджували також зразки, оброблені без СТС. Визначено, що застосування СТС значно покращує параметри покриття: товщина та мікротвердість збільшуються майже вдвічі, а суцільність поверхневого шару збільшується до 70–80 %. Під час мікроструктурного аналізу було визначено, що покриття складається з трьох зон: зміцненого шару, дифузійної зони й основи. Збільшення енергії розряду сприяє формуванню однорідного покриття, хоча й з підвищеною шорсткістю. Подальше підвищення енергії розряду не дає значного додаткового ефекту для підвищення твердості й суцільності. Отримані результати підтверджують ефективність використання наноконпонентів у технології ЕІЛ для значного покращення якісних параметрів поверхонь металевих деталей.

Ключові слова: електроіскрове легування, наноструктура, спеціальне технологічне середовище, нанотрубки

Вступ

Наноструктурування забезпечує унікальне поєднання високої міцності, твердості, зносо- та корозійної стійкості, які недосяжні для традиційних мікроструктурованих матеріалів. Це зумовлено дією трьох ключових ефектів. Ефект малого розміру та поверхневий ефект виникають, коли розмір частинок або зерен стає настільки малим, що їхні властивості кардинально змінюються, зокрема через обмеження руху дислокацій і домінування поверхневих атомів. Це дозволяє досягти значного зміцнення матеріалу. Крім того, квантовий ефект проявляється на розмірах, що менші за 10 нм, і змінює фізичні та механічні властивості, що дає змогу для застосування в різних сферах, зокрема у сферах національної безпеки, оборони та медицини [1, 2].

В умовах експлуатації машин і механізмів зношування, корозія та втомне руйнування розпочинаються з поверхневого шару. Тому формування наноструктурованих покриттів стає одним із найперспективніших способів підвищення терміну експлуатації і надійності обладнання. Такі покриття дозволяють не лише зміцнити робочу поверхню, але й зберегти пластичність та інші корисні властивості об'ємного матеріалу – основи.

Сучасні методи модифікації поверхні – іонно-плазмове та вакуумне напилення, плазмові технології, лазерна та електронно-променеве оброблення – застосовуються для створення наноструктурованих шарів. Проте більшість із них вимагає складного обладнання, значних енергетичних затрат, їх складно вбудувати в технологічний процес виготовлення деталей машин.

Тому привертає увагу метод електроіскрового легування (ЕІЛ), яке поєднує простоту реалізації, низьке енергоспоживання й екологічну безпечність [3]. Як зазначено в дослідженнях європейських [4] і вітчизняних [5] вчених, метод ЕІЛ дозволяє формувати на поверхні наноструктуровані шари з унікальним комплексом фізико-механічних властивостей: підвищеною твердістю, зносо-, жаро- та корозійною стійкістю. Крім того, метод дозволяє локально модифікувати поверхню деталей складної геометрії без термічного впливу на всю деталь [6].

Таким чином, дослідження процесів наноструктурування під час електроіскрового легування та встановлення зв'язку між режимами оброблення та властивостями сформованих покриттів є актуальним науково-практичним завданням. Це дає нові можливості для створення екологічно безпечних і

високоєфективних технологій зміцнення робочих поверхонь виробів.

Аналіз публікацій

Аналіз наукових робіт свідчить, що ЕІЛ є методом для покращення фізико-механічних властивостей поверхонь способом створення наноструктурованих покриттів. У роботах авторів [7, 8] зазначено, що за певних режимів ЕІЛ можна сформувати наноструктуроване покриття. Основними механізмами формування наноструктури є кристалізація металу з рідкого стану та пластична деформація. Незалежно від матеріалів електродів, на обробленій поверхні утворюється змінений шар із субдрібнополікристалічною структурою. Наприклад, у [9] визначено, що «білий шар» після ЕІЛ бронзою складається із зерен розміром до 60 нм.

У [10] доведено, що метод ЕІЛ дозволяє контролювати дисперсність кристалічної структури покриттів. Для формування покриттів з нано- та ультрадрібнозернистою структурою рекомендовано:

- використовувати режими з низькою енергією та тривалістю імпульсів;
- збільшувати питому тривалість оброблення;
- застосовувати катоди з низькою теплопровідністю й аноди з низькою теплоємністю;
- забезпечувати перенесення елементів анода на катод у твердому стані.

Під час дослідження було визначено, що наноструктуризація може здійснюватися не тільки внаслідок подрібнення структур, а й через використання анодних матеріалів з наноконструктивних. Таким чином, ЕІЛ дозволяє отримувати наноструктуровані шари. Проте в літературі майже немає інформації про технологічні особливості, обґрунтування вибору режимних параметрів і матеріалів, що дозволить визначити розроблення технологічних основ для ЕІЛ-наноструктурування як актуальне завдання.

Більшість нових технологій ЕІЛ орієнтовані на використання дрібнодисперсних порошків або композиційних матеріалів, що містять наночастинки [11–14]. У [15] автори досліджували наноструктурування вуглецевої сталі за допомогою електродів на основі карбиду вольфраму з додаванням нанопорошків глинозему.

Було визначено, що на поверхні підкладки утворюються впорядковані скупчення нанокластерів (розміром до 30 нм). Додавання орієнтовно 1 % глинозему до твердосплавного електрода ВК8 збільшувало ефектив-

ність формування легованого шару в 3 рази, а мікротвердість покриття – до 4 разів.

З огляду на роботи [13–15] застосування анодів з наноструктурними компонентами навіть у невеликій кількості значно покращує фізико-механічні властивості та зносостійкість ЕІЛ-покриттів.

Створити легувальні електроди-інструменти з наночастинками можливо за допомогою методу саморозповсюджуваного високо-температурного синтезу (СВС), але він є складним і дорогим [14].

У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення відносно простого в реалізації, економічного та ефективного методу отримання наноструктурованих покриттів методом ЕІЛ з попереднім нанесенням на оброблювану поверхню спеціального технологічного середовища (СТС), що містить наночастинки дозованої кількості.

Для створення таких середовищ із наночастинками як зв'язку часто використовують полімерні матеріали. Важливим питанням є рівномірне диспергування нанонаповнювачів. Найпоширенішими методами є ультразвукове диспергування, високошвидкісне перемішування та каландрування [16]. Як полімерний наповнювач зазвичай використовують вуглецеві нанотрубки. Метод ультразвукового диспергування застосовують для розподілу вуглецевих нанотрубок у розчинниках, епоксидних олігомерах і деяких полімерах. Автори в [17] підтвердили, що ультразвукове перемішування дозволяє рівномірно розподілити нанонаповнювач в епоксидній смолі, уникаючи дефектів, що виникають через порушення цілісності нанотрубок. Додавання нанонаповнювачів до неметалевої матриці надає композитам унікальних властивостей, у деяких випадках недостижних для литих матеріалів.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є вдосконалення технології поверхневого зміцнення методом ЕІЛ за допомогою СТС, що містять вуглецеві нанотрубки. Цей підхід спрямований на покращення якості зміцнених шарів, зокрема їхньої товщини, суцільності та мікротвердості.

Методика дослідження

Для дослідження були виготовлені зразки з Армко-заліза, щоб уникнути впливу легувальних елементів на процес структуроутворення під час процесу ЕІЛ. Це дає змогу вивчати властивості покриттів у «чистому» вигляді.

Формування покриттів здійснювалося методом ЕІЛ з використанням молібденових електродів. Для рівномірного розподілу вуглецевих нанотрубок у матриці застосовувався метод ультразвукового диспергування відповідно до технології, поданої у [17]. Склад технологічного середовища був вибраний емпірично, щоб забезпечити однорідний розподіл наночастинок.

До складу спеціального технологічного середовища належали багатостінні вуглецеві нанотрубки САВОТ (0,25 мас.%), дисперговані у водному розчині з поверхнево-активними речовинами (сульфанол).

ЕІЛ проводили на установці «Елітрон-22А» (рис. 1). Для експериментів були визначені два значення енергії розряду: 0,13 Дж та 0,52 Дж.



Рис. 1. Установка «Елітрон-22А» для проведення ЕІЛ

Шорсткість поверхні зразків після електроіскрового легування (ЕІЛ) вимірювалася за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 заводу «Калібр», а результати відображалися на моніторі комп'ютера.

Для визначення твердості за Віккерсом, а також її розподілу на поверхні та в глибині зміцненого шару використовувався твердомір NOVA 330/360 (виробник Innovatest Europe BV, Нідерланди). Вимірювання здійснювалися відповідно до стандартів ГОСТ 2999-75 та ISO 6507.

Зразки з Армко-заліза обробляли в три етапи:

- перший етап: легування поверхні молібденовим електродом із застосуванням енергії розряду (W_p) 0,13 або 0,52 Дж;
- другий етап: нанесення на поверхню спеціального технологічного середовища (СТС), що містить наночастинок;
- третій етап: повторне оброблення ЕІЛ молібденовим електродом за тієї самої енергії розряду, що і на першому етапі, не чекаючи висихання СТС.

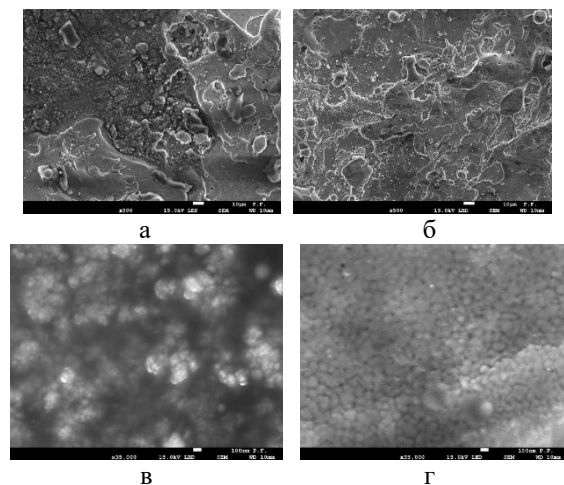
Для порівняльного аналізу були також досліджені зразки з Армко-заліза, оброблені лише ЕІЛ молібденовим електродом за енергії 0,13 або 0,52 Дж, без використання СТС.

Мікроструктурні параметри покриттів досліджувалися на мікрошліфах за допомогою оптичного мікроскопа Hirox KH-8700 та сканувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник – Oxford Instruments plc).

Для ідентифікації структурних компонентів і підвищення контрасту між ними мікрошліфи з матеріалів електродів після ЕІЛ виготовлялися в різних перерізах (поперечних, поздовжніх, косих) та піддавалися хімічному травленню спеціальними реактивами. Процес виготовлення та дослідження шліфів здійснювали відповідно до відомих методик, наведених у [18]. Для хімічного травлення Армко-заліза використовувався 3–5-відсотковий розчин азотної кислоти в етиловому спирті.

Результати та їх обговорення

На рис. 2 наведено зовнішній вигляд поверхні зразків з Армко-заліза після ЕІЛ. Оброблення здійснювали за схемою Мо-СТС-Мо.

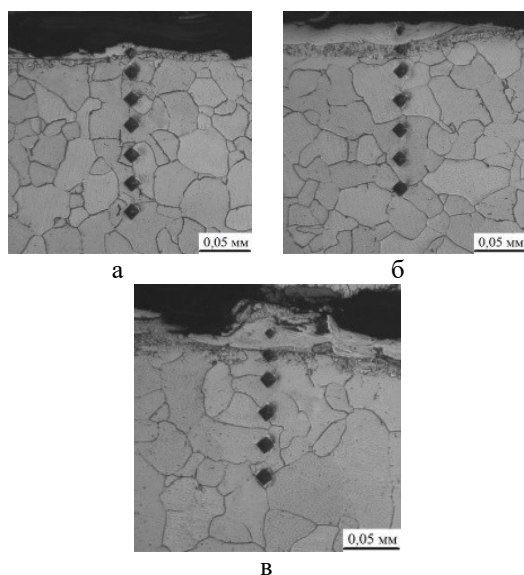


а, в – за $W_p = 0,13$ Дж; б, г – за $W_p = 0,52$ Дж
а, б – $\times 500$; в, г – $\times 35000$

Рис. 2. Топографія поверхні зразків із Армко-заліза, оброблених за схемою Мо-СТС-Мо

Аналіз топографії доводить, що збільшення енергії розряду призводить до формування більш однорідного та суцільного покриття, хоча його шорсткість збільшується. За максимальної енергії розряду ($W_p = 0,52$ Дж) у покритті спостерігається рівномірний розподіл наноконпонентів вздовж всієї поверхні (рис. 2, г).

Металографічні дослідження зразків здійснювали на оптичному металографічному мікроскопі. Мікроструктури сформованих покриттів наведено на рис. 3.



а – без СТС, якщо $W_p = 0,13$ Дж;
б, в – з використанням СТС,
якщо $W_p = 0,13$ Дж і $W_p = 0,52$ Дж, відповідно

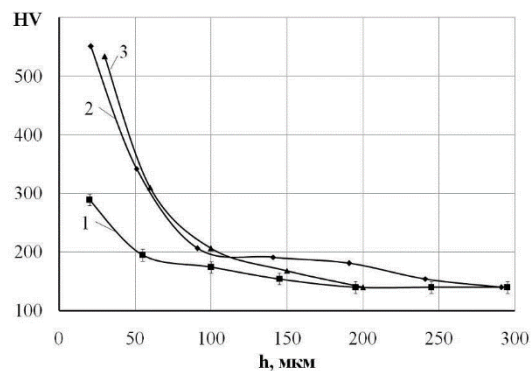
Рис. 3. Мікроструктури покриттів на Армко-залізі після ЕІЛ. Порівняння структури

Після ЕІЛ мікроструктура покриття складається з трьох зон: зміцнений «білий» шар: верхня зона, стійка до травлення реактивами; дифузійна зона: проміжний шар; основа: феритна структура, визначальна для Армко-заліза.

Під час оброблення зразків без СТС на поверхні утворюється тонкий та несучільний шар. Використання СТС з багатостінними вуглецевими нанотрубками (0,25 мас.%) у водному розчині з сульфанолам значно змінює параметри покриття. Як показано в табл. 1, це призводить до збільшення товщини та мікротвердості покриття майже в 2 рази, а також збільшує його суцільність з 50 % до 70–80 %. Ці результати також доводяться діаметричними дослідженнями, результати яких подано на рис. 4.

Таблиця 1 – Параметри покриттів

Додавання СТС	W_p , Дж	Суцільність поверхневого шару, %	Товщина «білого шару», мкм	Мікротвердість поверхневого шару, НВ
Без СТС	0,13	50	20-30	289
З СТС	0,13	80	30-40	551
	0,52	70	30-40	534



1 – без СТС; 2 – з СТС і ЕІЛ, якщо $W_p = 0,13$ Дж;
3 – з СТС і ЕІЛ, якщо $W_p = 0,52$ Дж

Рис. 4. Розподіл мікротвердості в покриттях на зразках із Армко-заліза, оброблених за схемою Мо-СТС-Мо:

Збільшення енергії розряду ЕІЛ з 0,13 до 0,52 Дж не дає значного ефекту у збільшенні твердості та суцільності покриття.

Висновки

Аналіз результатів електроіскрового легування поверхні Армко-заліза із застосуванням спеціального технологічного середовища, що містило багатостінні вуглецеві нанотрубки, дозволив сформулювати такі висновки:

- зі збільшенням енергії розряду з 0,13 Дж до 0,52 Дж спостерігається формування однорідного та суцільного покриття, незважаючи на підвищення шорсткості поверхні. Зокрема за 0,52 Дж у структурі покриття виявлено рівномірно розподілені нановключення;

- застосування СТС істотно покращує характеристики покриттів. На відміну від оброблення без СТС, яке супроводжується утворенням тонкого й несучільного шару, використання нанотрубок забезпечує збільшення товщини та суцільності покриття.

Процес оброблення із застосуванням СТС сприяє підвищенню мікротвердості поверхні майже в два рази. Подальше збільшення енергії розряду не призводить до додаткового збільшення твердості.

Результати частково отримано в межах науково-дослідного проєкту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. No 0124U000539, Сумський державний університет).

Література

1. Morshed-Behbahani K., Farhat Z., Nasiri A. Effect of Surface Nanocrystallization on Wear Behavior of Steels: A Review. *Materials* 2024. 17. 1618. <https://doi.org/10.3390/ma17071618>
2. Aliofkhazraei M. Size Effect in Mechanical Properties of Nanostructured Coatings. *Nanocoatings. Engineering Materials*. 2011. P 149–184. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17966-2_5
3. Марцинковський В. А., Тарельник В. Б., Антошевський Б. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання: монографія. 2018. 283 с.
4. Corrosion and wear properties of FeCrMnCoSi HVOF coatings / G. Y. Koga et al. *Surf. Coat. Technol.* 2019. 357. P. 993–1003.
5. Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: a Review / Y. Gu et al. *Coatings*. 2020. 10. 233. <https://doi.org/10.3390/coatings10030233>
6. Гапонова О. П. Променеві методи поверхневого оброблення матеріалів: навч. посібник. 2025. 143 с.
7. Mashkov Y. K., Korotaev D. N., Baibaratskaya M. Y. Nanostructured coatings synthesized by electro-spark machining. *Tech. Phys.* 2015. 60. P. 1489–1493. <https://doi.org/10.1134/S1063784215100217>
8. Sakhapov R. L., Makhmutov M. M., Sultanov V. A. Study of electric spark coatings of nanocrystal structure. *Journal of Physics: Conference Series*. V. 1588. 2020. doi:10.1088/1742-6596/1588/1/012030
9. Ivanov V. I. On the management of nanostructuring of electric spark coatings. *Lett. Mater.* 2020. 10(4). P. 427–432. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-427-432>
10. Sakhapov R. L., Makhmutov M. M., Sultanov V. A. Study of electric spark coatings of nanocrystal structure. *Phys.: Conf. Ser.* 2020. 1588. doi:10.1088/1742-6596/1588/1/012030
11. Yurchenko V. I., Yurchenko E. V., Dikuser A. I. Thick-Layer Nanostructured Electrospark Coatings of Aluminum and Its Alloys. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2020. 56. P. 656–664. <https://doi.org/10.3103/S1068375520060162>
12. Electrospark coatings produced by ceramic nanostructured SHS electrode materials / P. M. Bazhin et al. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2016. 52. P. 217–224. <https://doi.org/10.3103/S1068375516030030166>
13. Xiang Wei, Zhiguo Chen, Jue Zhong, Yong Xiang Feasibility of preparing Mo₂FeB₂-based cermet coating by electrospark deposition on high speed steel. *Surface and Coatings Technology*. 296. 2016. P. 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.03.090>
14. Nikolenko S. V., Igumnov P. V., Gordienko P. S. Al₂O₃ matrix composite materials for electro spark deposition on carbon steel. *Solid State Phenomena*. 2021. 316. P. 745–751. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.745>
15. Hossein Aghajani, Ebrahim Hadavand, Naeimeh-Sadat Peighambaroust, Shahin Khameneh-asl. Electro spark deposition of WC-TiC-Co-Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces and Interfaces*. 2020. 18. P. 100392 <https://doi.org/10.1016/j.surf.2019.100392>
16. Thakre P. R., Bisrat Y., Lagoudas D. C. Electrical and mechanical properties of carbon nanotube-epoxy nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. Vol. 116. No. 1. P. 191–202.
17. Yasmin A., Luo J.-J., Daniel I.M. Processing of expandet graphite reinforced polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2006. 66. P. 1179–1186.
18. Структурний аналіз металів. *Металографія. Фрактографія* / О. М. Бялік та ін. Київ, 2006. 328 с.

References

1. Morshed-Behbahani, K., Farhat, Z., Nasiri, A. (2024). Effect of Surface Nanocrystallization on Wear Behavior of Steels: A Review. *Materials*, 17, 1618. [in English].
2. Aliofkhazraei, M. (2011). Size Effect in Mechanical Properties of Nanostructured Coatings. *Nanocoatings. Engineering Materials*, P. 149–184 [in English].
3. Martsynkovskyi, V. A., Tarelnyk, V. B., Antoshevskyi, B. (2018). Ekologichna bezpeka ekspluatatsii kompresornoho i nasosnoho obladnannia [Environmental safety of operation of compressor and pumping equipment]: monohrafiia. 283 [in Ukrainian].
4. Koga, G. Y., Wolf, W., Schulz, R., Savoie, S., Bolfarini, C., Kiminami, C. S., Botta, W. J. (2019). Corrosion and wear properties of FeCrMnCoSi HVOF coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 357, p. 993–1003 [in English].
5. Gu, Y., Xia, K., Wu, D., Mou, J., Zheng, S. (2020). Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: a Review. *Coatings*, 10, 233 [in English].
6. Haponova, O. P. (2025). Promenevi metody poverkhnivoho obrobлення materialiv [Radiation methods for surface treatment of materials]: navchalnyi posibnyk, 143 s. [in Ukrainian].
7. Mashkov, Y. K., Korotaev, D. N., Baibaratskaya, M. Y. (2015). Nanostructured coatings synthesized by electro-spark machining. *Tech. Phys.*, 60, p. 1489–1493 [in English].
8. Sakhapov, R. L., Makhmutov, M. M., Sultanov, V. A. (2020). Study of electric spark coatings of nanocrystal structure. *Journal of Physics: Conference Series*, V. 1588, [in English].
9. Ivanov, V. I. (2020). On the management of nanostructuring of electric spark coatings. *Lett. Mater.*, 10(4), P. 427–432 [in English].
10. Sakhapov, R. L., Makhmutov, M. M., Sultanov, V. A. (2020). Study of electric spark coatings of nanocrystal structure. *Phys.: Conf. Ser.*, 1588 [in English].
11. Yurchenko, V. I., Yurchenko, E. V., Dikuser, A. I. (2020). Thick-Layer Nanostructured Electrospark Coatings of Aluminum and Its Alloys. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 56, P. 656–664 [in English].

12. Bazhin, P. M., Stolin, A. M., Zaripov, N. G. et al. (2016). Electrosark coatings produced by ceramic nanostructured SHS electrode materials. *Surf. Engin. Appl. Electrochem*, 52, P. 217–224 [in English].
13. Xiang Wei, Zhiguo Chen, Jue Zhong, Yong Xiang Feasibility of preparing Mo₂FeB₂-based cermet coating by electrosark deposition on high speed steel. *Surface and Coatings Technology*, 296, 2016, P. 58–64 [in English].
14. Nikolenko, S. V., Igumnov, P. V., Gordienko, P. S. (2021). Alumo matrix composite materials for electro spark deposition on carbon steel. *Solid State Phenomena*, 316, P. 745–751 [in English].
15. Hossein Aghajani, Ebrahim Hadavand, Naeimeh-Sadat Peighambaroust, Shahin Khameneh-asl. Electro spark deposition of WC-TiC-Co-Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces and Interfaces*, 2020, 18, P. 100392 [in English].
16. Thakre, P. R., Bisrat, Y., Lagoudas, D. C. (2010). Electrical and mechanical properties of carbon nanotube- epoxy nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, Vol. 116, No. 1, P. 191–202 [in English].
17. Yasmin, A., Luo, J.-J., Daniel, I. M. (2006). Processing of expandet graphite reinforced polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 66, P. 1179–1186 [in English].
18. Bialik, O. M., Kindrachuk, M. V., Kondratiuk, S. Ye., Chernenko, V. S. (2006). Strukturnyi analiz metaliv [Structural analysis of metals]. Metalohrafiia. Fraktohr-rafiia. 328 s [in Ukrainian].

Гапонова Оксана Петрівна, д-р техн. наук, професор кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, тел. +38 0542-64-09-49,

gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Охріменко Віктор Олександрович, аспірант, кафедра прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, тел. +380956515610

v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua

Смоленко Станіслав В'ячеславович, аспірант, кафедра прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, тел. +380955754168

stassmolenko@gmail.com

Nanostructuring of metal surfaces by electrosark deposition

Introduction. The paper discusses the relevance of nanostructuring materials to enhance their physical and mechanical properties, such as strength, hardness, and wear resistance, which are critically important for mechanical engineering. It is emphasized that the unique characteristics of nanomaterials are due to the small-size effect, the surface effect, and the quantum effect. Existing surface modification methods are analyzed, highlighting their drawbacks, such as high cost and equipment complexity. In this regard, the focus is on the electrosark deposition (ESD) method as an environmentally safe, energy-

efficient, and easy-to-implement technology. The results of studies confirming ESD's ability to form nanostructured layers that improve surface properties are presented. Particular attention is paid to an innovative approach: the use of special technological media (STMs) containing nanoparticles. It is argued that this method is more economical and simpler than traditional technologies for creating nanocomposite electrodes. Methods for dispersing nanofillers, particularly ultrasonic mixing, which ensures a uniform distribution of nanotubes in polymer materials, are also considered. The conclusion of this section emphasizes the scientific and practical significance of studying nanostructuring processes during ESD to develop highly effective surface hardening technologies. **Methodology.** This section outlines the experimental methodology for electrosark deposition (ESD) conducted on Armco iron samples to study coating properties without the influence of alloying elements. To form the coatings, molybdenum electrodes and a special technological medium (STM) with carbon nanotubes were used, with the nanotubes uniformly dispersed via ultrasonic mixing. The treatment was a three-stage process: initial ESD, application of the STM, and a second round of ESD. Coating parameters, including roughness, hardness, and microstructure, were evaluated using specialized equipment such as a profilograph-profilometer, a NOVA 330/360 hardness tester, and optical and electron microscopes. A comparative analysis was also performed on samples treated without the STM. **Results and Discussion.** This paper demonstrates that using a special technological environment with carbon nanotubes during electrosark deposition significantly improves the properties of the coating on Armco iron. Analysis of the topography and microstructure shows that the use of a special technological medium leads to the formation of a more continuous and uniform layer compared to treatment without it. Additional measurements confirm that the use of this medium increases the coating's microhardness (by almost twofold) and thickness, as well as its continuity up to 80%. It was also found that a further increase in discharge energy does not bring significant improvement, which allows for the optimization of process parameters.

Keywords: electrosark deposition, nanostructure, special technological medium, nanotubes.

Oksana Gaponova, DSc, Professor, Professor of the Applied Material Science and Technology of Constructional Materials Department, ORCID: 0000-0002-4866-0599,

gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Viktor Okhrimenko, PhD student of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials Department, ORCID: 0000-0002-3119-8262,

v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua

Stanislav Smolenko, PhD student of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials Department, ORCID: 0009-0009-0107-5980,

stassmolenko@gmail.com